Tuotantofunktion sekä panos- ja tuotoshintojen vaikutus taloudellisesti optimaaliseen mallasohran typpilannoitukseen

Joel Jurkola
Helsingin yliopisto
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta
Taloustieteen osasto
Maatalousekonomia
Maisterintutkielma

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty	Laitos/Institution– Department
Maatalous- ja metsätieteellinen tiedekunta	Taloustieteen osasto

Tekijä/Författare – Author

Joel Jurkola

Työn nimi / Arbetets titel – Title

Tuotantofunktion sekä panos- ja tuotoshintojen vaikutus taloudellisesti optimaaliseen mallasohran typpilannoitukseen

Oppiaine /Läroämne – Subject

Maatalousekonomia

Työn laji/Arbetets art – Level	Aika/Datum – Month and year	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages
maisterintutkielma	4/2019	54

Tiivistelmä/Referat – Abstract

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää mikä tuotantofunktion muoto kuvaa parhaiten mallasohran satovastetta. Toisena tavoitteena oli tarkastella miten panos- ja tuotoshintojen vaihtelu vaikuttaa optimaaliseen typpilannoituksen tasoon mallasohran tuotannossa, kun huomioidaan mallasohran laatuvaatimukset.

Tutkimuksen teoriaosassa tarkastellaan ensin lannoitteiden ja mallasohran hintojen kehitystä 2000-luvulla. Tämän jälkeen käsitellään kasvin sadonmuodostukseen liittyviä sisäisiä ja ulkoisia tekijöitä. Typpilannoitus on keskeisimpiä kasvin kasvuun vaikuttavia tekijöitä. Varsinkin mallasohran viljelyssä typpilannoituksen oikealla tasolla on keskeinen rooli, koska typpilannoitus vaikuttaa sadon proteiinipitoisuuteen, joka on mallasohran keskeisimpiä laatuvaatimuksia. Teoriaosassa käsitellään myös mallasohran viljelyä Suomessa.

Teoriaosassa tarkastellaan myös tuotantofunktiomuotoja ja klassiseen tuotantofunktioon liittyviä oletuksia sekä aiempia tutkimuksia, jotka liittyvät typen satovastetta kuvaavien tuotantofunktiomuotojen vertailuun. Tutkimuksessa käydään läpi myös taloudellisen optimin määrittämistä tuotantofunktiosta.

Tutkielman aineistona on Yaran Kotkaniemen tutkimusasemalla kerätty mallasohran lannoituskoeaineisto vuosilta 2009–2018. Aineisto sisältää 21 mallasohralajikkeen lannoituskoetietoja. Aineiston lannoituskokeissa on lajikkeesta ja vuodesta riippuen 1–4 kerrannetta ja aineisto sisältää yhteensä 368 havaintoa. Tutkimusmenetelmänä on regressioanalyysi ja vertailtavat funktiomuodot kvadraattifunktio, Mitscherlich-funktio, neliöjuurifunktio sekä lineaarinen funktio tasanteella.

Tutkimuksen tulosten perusteella mallasohran typpilannoituksen satovastetta kuvasi parhaiten kvadraattifunktioon sekä Mitscherlich-funktioon perustuvat mallit. Neliöjuurifunktioon perustuvien mallien antama lannoitussuositus oli epärealistisen korkea, jonka vuoksi mallia tarkasteltiin lisäämällä siihen toisen asteen termi. LRP-mallin BIC-testisuure ei myöskään poikennut juurikaan muista malleista, mutta testisuure oli hieman muita malleja suurempi, jolloin malli ei selittänyt datan kokonaisvaihtelua yhtä hyvin kuin muut mallit.

Tutkimuksessa vertailtiin estimoitujen funktioiden taloudellisesti optimaalisia lannoitustasoja lannoitteen ja mallasohran vuosien 2009, 2014 ja 2017 hintasuhteilla. Sadon enimmäisvalkuaispitoisuuden aiheuttama rajoite rajoitti lannoitusta ainoastaan vuoden 2009 lannoitteen ja mallasohran hintasuhteella. Vuosien 2014 ja 2017 hintasuhteilla taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso oli alempi kuin valkuaispitoisuuden aiheuttama rajoite.

Avainsanat – Nyckelord – Keywords
typpilannoitus, mallasohra, regressioanalyysi,

Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited
E-thesis

Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information

Ohjaajana professori Timo Sipiläinen, Helsingin yliopisto

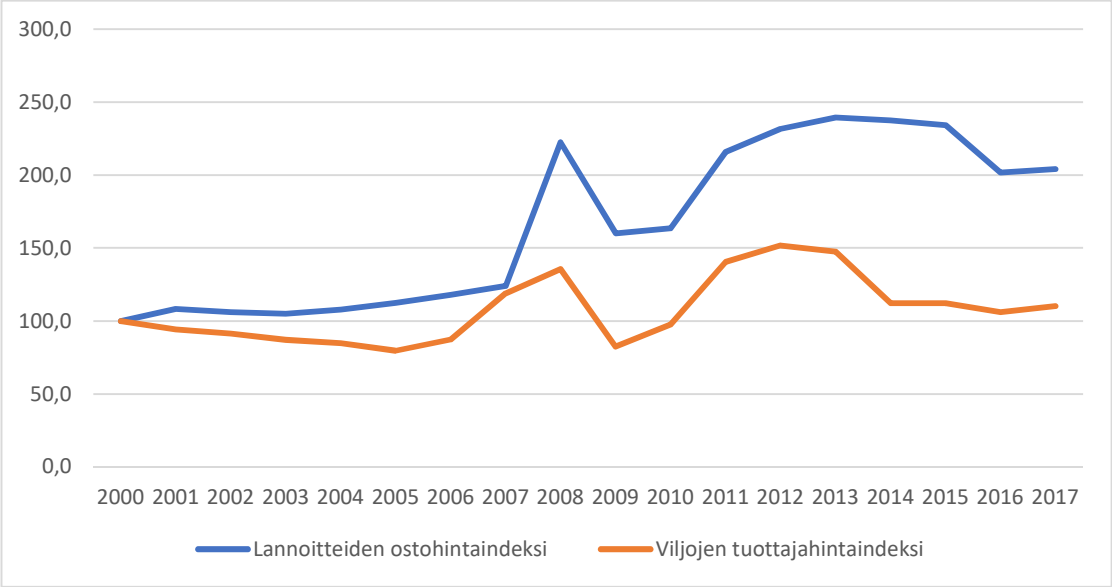
Sisällys

1. Johdanto

1.1. Tutkimuksen tausta

Viljatilat ovat kärsineet koko 2000-luvun heikosta kannattavuudesta kannattavuuskertoimen ollessa vuosina 2000–2016 keskimäärin 0,32. Vuonna 2016 viljatilojen kannattavuuskerroin oli 0,03, jolloin omalle työlle ja pääomalle ei jäänyt oikeastaan ollenkaan korvausta. (Taloustohtori 2018.)

Alla olevassa kuviossa 1 on kuvattu lannoitteiden ja maanparannusaineiden ostohintaindeksin sekä viljan tuottajahintaindeksin muutos vuosina 2000–2017. Kuvion perusteella voidaan todeta, että lannoitteiden ostohinnat ovat nousseet yli kaksinkertaisiksi tarkastelujaksolla. Viljan tuottajahinta on kuvion mukaan tarkastelujaksolla jossain määrin noudattanut lannoitteiden hintakehityksen muutoksia, mutta tarkastelujakson lopussa viljan tuottajahinta on samalla tasolla kuin alussa, kun taas lannoitteen hinta on kaksinkertaistunut. Vuosina 2014–2016 lannoitekustannuksen osuus viljatilojen muuttuvista kustannuksista oli keskimäärin 45–50 % (Viljatietopankki 2018). Koska lannoitekustannuksen osuus kaikista muuttuvista kustannuksista on suuri, on tärkeää kiinnittää huomiota taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon etenkin kasvinviljelyn kannattavuuden ollessa muutenkin heikko.



KUVIO 1. Lannoitteiden ja maanparannusaineiden ostohintaindeksi sekä viljan tuottajahintaindeksi Suomessa 2000–2017 (Tilastokeskus 2018).

Arovuori, Toikkanen ja Yrjölä (2016, 2–3) toteavat Kansallisen viljastrategian välirapportissa kansainvälisten viljamarkkinoiden hintamuutosten olevan edelleen nopeita, vaikka muutosten suuruus on pienentynyt viime vuosien aikana. Lisäksi markkinat reagoivat erilaisiin markkinasignaaleihin paremmin kuin aikaisemmin, koska esimerkiksi kasvukauden tuotantoennustuksissa tapahtuneet muutokset eivät ole viime vuosina johtaneet äkilliseen hintareaktioon, vaan hintamuutokset ovat toteutuneet loivina. Suomen viljamarkkinat ovat yhä enemmän integroituneet kansainvälisiin viljamarkkinoihin, jolloin maailmanmarkkinoiden muutokset välittyvät kotimaan markkinoille sellaisenaan. Hintataso määräytyy kuitenkin edelleen kotimaan kysyntä-tarjonta tilanteen perusteella. (Arovuori ym. 2016, 3.)

Globaalisti katsottuna maailman väestö kasvaa sekä lukumäärältään että ostovoimaltaan, mikä tarkoittaa kasvavaa ruoan ja eläinrehujen ja tätä kautta kasvinravinteiden kuten typen kysyntää. Koska väkilannoitteiden raaka-aineena käytetään uusiutumattomia luonnonvaroja, paine niiden käytön tehokkuuden lisäämiseen kasvaa. Lannoitteiden

käytön tehokkuuden lisäämisen tulisi myös samanaikaisesti parantaa tuottavuutta ja viljelyn kannattavuutta. Tämän lisäksi kasvava huoli maatalouden ympäristövaikutuksista kasvattaa kiinnostusta ravinteiden käytön tehokkuuteen. (Snyder & Bruulsema 2007, 1.) On todettu, että taloudellisesti optimaalinen typpilannoitus usein vähentää typen ravinnehuuhtoumia (Hong ym. 2007, 360).

1.2. Tutkimuksen tavoite ja viitekehys

Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, mikä tuotantofunktiomuoto kuvaa parhaiten mallasohran satovastetta typen suhteen. Tuotantofunktiomuodon selvittämisen jälkeen määritetään taloudellisesti optimaalinen typpilannoituksen taso mallasohran tuotannossa. Tutkimuksen tavoitteena on myös tarkastella, miten lannoitteiden sekä mallasohran markkinahintojen vaihtelut vaikuttavat optimaaliseen lannoituksen tasoon.

Tutkimuksessa estimoidaan lajikekoeaineistosta mallasohran tuotantofunktio käyttäen tuotantofunktion muotoina kvadraattifunktiota, Mitscherlich -funktiota sekä funktiota tasanteella (LRP-malli). Tutkimuksen tavoitteena on selvittää,

1. mikä tuotantofunktion muoto kuvaa parhaiten mallasohran satovastetta typpilannoitukseen, ja

2. miten panos- ja tuotoshintojen vaihtelu vaikuttaa optimaaliseen typpilannoituksen tasoon mallasohran tuotannossa, kun huomioidaan mallasohran laatuvaatimukset.

2. Kasvin sadonmuodostus ja mallasohran viljely

2.1. Sadonmuodostus

Kasvutekijät määräväät kasvin sadon määrän ja laadun sekä vaikuttavat kasvin kasvuun. Kasvutekijät voidaan jaotella sisäisiin ja ulkoisiin kasvutekijöihin. Sisäisiä kasvutekijöitä ovat kasvilaji sekä lajike, jotka määräytyvät perinnöllisesti. Ulkoisia kasvutekijöitä ovat säähän liittyvät tekijät kuten valo, joka toimii kasvien energialähteenä ja lämpötila, joka määrää kasvukauden pituuden. Ulkoisia kasvutekijöitä ovat myös maaperään liittyvät kemialliset kasvutekijät kuten ravinteet ja maan happamuus sekä fysikaaliset kasvutekijät kuten ilmavuus, vesitalous, mekaaninen vastus, lämpöominaisuudet, huokosrakenne sekä lujuusominaisuudet. (Yli-Halla 2009, 6–7.) Tulee huomioida, että kasvintuotanto sisältää monimutkaisia suhteita eri osatekijöiden kuten maaperän, maaperämikrobien, juurien, kasvien ja viljelykiertojen välillä. Panostukset yhden osatekijän parantamiseen saattavat parantaa koko kasvintuotannon tuottavuutta tai olla parantamatta sitä. Lisäksi lyhyen aikavälin hyödyt saattavat joskus syntyä pitkän aikavälin hyötyjen kustannuksella. (Snyder & Bruulsema 2007, 1.)

Perustan ulkoisten kasvutekijöiden suotuisuudelle luovat ilmasto ja maaperä, mutta viljelijä pystyy ainakin jossain määrin vaikuttamaan ulkoisiin kasvutekijöihin. Ojituksella ja kastelulla voidaan säädellä maan vesitaloutta, kasvien vedensaantia sekä epäsuorasti maan lämpööloja. Maan happamuutta on mahdollista vähentää kalkituksella ja myös maan rakenteen on mahdollista vaikuttaa. Viljelijälle on kuitenkin helpointa säädellä kasviravinteiden määrää. (Yli-Halla 2009, 7.)

Kasvinravinteiksi määritellään kaikki alkuaineet, joita kasvi tarvitsee kehitykseen siemenestä uuteen itämiskykyiseen siemeneen. Kasvinravinteet voidaan ryhmitellä pääravinteiksi ja sivuravinteiksi. Pääravinteita ovat typpi, fosfori ja kalium, jotka ovat usein kasvun minimitekijöitä, ja sivuravinteita ovat kalsium, magnesium ja rikki. Edellä mainittujen lisäksi kasvi tarvitsee kasvuunsa tiettyjä hivenravinteita. Lisäksi on olemassa alkuaineita,

jotka voivat olla kasville hyödyllisiä tai jopa lisätä satoa, mutta ne eivät ole kasvin elinkierrossa välttämättömiä. Periaatteessa mikään ravinteista ei ole toista tärkeämpi, koska minkä tahansa ravinteen puute voi haitata kasvua tai estää sen kokonaan. (Yli-Halla 2009, 7–8.) Tätä kutsutaan von Liebigin minimitekijän laiksi, jonka mukaan tuotantokasvin sadon määrää rajoittaa epäedullisin kasvutekijä, jolloin sadon suuruus riippuu ensi sijassa kulloinkin suhteellisesti vähiten suotuisasta kasvutekijästä (Paris 1992, 1091).

2.2. Typpilannoitus

Kasvin typenotto maaperästä on yksi kaikkein tärkeimmistä kasvin kasvuun vaikuttavista tekijöistä. (Tapio ym. 2013, 6) Kasvi ottaa typen ammonium- (NH_4^+) tai nitraattitypen muodossa. Edellä mainittuja typen muotoja kutsutaan mineraalitypeksi. Suomessa lannoittamattomassa maassa olevan mineraalitypen määrä on niin pieni, että se on lähes poikkeuksetta kasvun minimitekijä. (Yli-Halla 2009, 14.) Kasville käytettävissä olevan typen määrä riippuu maaperän eloperäisestä aineesta ja maaperämikrobien aktiivisuudesta sekä palkokasvien viljelyn kautta biologisen typensidonnan kautta maaperään muodostuvasta typestä. Typpilannoitus karjanlannalla, muilla typpipitoisilla materiaaleilla tai kemiallisilla lannoitteilla on joka tapauksessa pääasiallinen keino tarjota viljelykasville sen tarvitsema typpi mahdollisimman suuren sadon saavuttamiseksi (Tapio ym. 2013, 6). Koska typpilannoitus vaikuttaa ratkaisevasti viljelykasvin satoon, on typpilannoituksen tason valitseminen yksi tärkeimmistä kasvinviljelyn vuotuisista päätöksistä (Jensen & Schjoerring 2011, 43). Varsinkin mallasohran viljelyssä tulee kiinnittää erityistä huomiota typpilannoituksen tasoon, koska korkeampi typpilannoituksen taso lisää sadon proteiinipitoisuutta. (Therrien ym. 1994, 547). Ohrasadon sopivuuden mallasohraksi määrää pääasiassa sadon proteiinipitoisuus (Gali & Brown 2000, 270). Sadon proteiinipitoisuuden kasvu korkeamman typpilannoitustason seurauksena nostaa mallasohran viljelijän tuotantoriskiä, koska proteiinipitoisuudeltaan liian korkea ohrasato ei välttämättä täytä mallasohran jäljempänä kuvattuja laatuvaatimuksia. Tällöin sadon proteiinipitoisuudesta riippuen mallasohran hinnasta vähennetään 5–10 euroa/tonni tai vaihtoehtoi-

sesti viljelijä joutuu myymään sadon rehuohrana (Viking Malt 2018). Viljelijän mallasohrasta saama hinta oli vuonna 2017 noin 17 % korkeampi kuin rehuohran (Luonnonvarakeskus 2018c.)

Suomessa peruslaadun mallasohran laatuvaatimuksien korkein sallittu proteiinipitoisuus on 11,5 % ja minimilaadun 12 % (Viking Malt 2018). Panimolle mallasohran liian korkea proteiinipitoisuus aiheuttaa vaahdon muodostumista olueen, joka voi aiheuttaa ongelmia suodatusprosessissa ja myöhemmin oluen vanhetessa. Toisaalta ohran matala proteiinipitoisuus vähentää vaahtoa, mutta lisää riskiä oluen liian vähäiseen käymiseen. Mallastamoissa matalan proteiinipitoisuuden omaava ohra mallastuu nopeammin kuin proteiinipitoisuudeltaan korkea ohra. (Gali ym. 2000, 270.)

Kaikilla viljalajeilla on todettu negatiivinen suhde sadon ja sadon proteiinipitoisuuden välillä. Sadon kasvaessa sen proteiinipitoisuus vastaavasti laskee. (Simmonds 1995, 309; Baraclough ym. 2010, 10) Tämän lisäksi aikaisemmissa tutkimuksissa on osoitettu, että ohran proteiinipitoisuuteen vaikuttavat sekä ympäristöolosuhteet kuten kasvukauden sää ja typpilannoitus että lajikevalinta, vaikka vaikutukset voivat vaihdella (Therrien ym. 1994; Torp ym. 1981.)

Mallasohralla on myös muita kuin proteiinipitoisuuteen liittyviä laatuvaatimuksia. Mallastuksen perusedellytys on itävyys, koska maltaiden mäskäyksessä tärkkelyksen ja proteiinien hajottamiseen tarvittavat entsyymit muodostuvat ohran itämisessä. Lisäksi ohran jyväkoon tulee olla riittävä, koska suurempien jyvien valkuaispitoisuus on yleensä alhainen ja siten tärkkelyspitoisuus on korkea, jauhautuvuus on hyvä ja kuoren osuus on vähäinen. Suuri jyväkoko merkitsee myös nopeampaa mallastumista. Laatuvaatimuksien mukaan peruslaadun mallasohralla vähintään 90 % jyvistä tulisi olla jyväkooltaan yli 2,5 mm ja enintään 3 % jyvistä saa olla jyväkooltaan alle 2,2 mm. (Kontturi & Seppälä 1987, 2.)

Holm, Malik ja Johansson (2018) ovat tutkineet NPK-starttilannoitteen, viljelyalueen sijainnin, viljelyvuoden ja maaperän vaikutusta mallasohran satoon ja sadon laatuun Ruotsissa. Tutkimuksessa todetaan maaperän ja ympäristöolojen kuten viljeltävän lohkon sijainnin ja kasvukauden sääolosuhteiden määrittävän mallasohran sadon ja laadun niin vahvasti, että starttilannoituksen vaikutus jää usein epäselväksi. Tutkimuksen mukaan karkean maalajin viljelylohkojen kyky tuottaa korkea ja hyvälaatuinen sato on parempi kuin savimaan. Toisaalta tutkimuksessa myös todetaan, että maaperän korkea lämpötila jyvän täyttymisen aikaan karkeilla maalajeilla voi johtaa huomattavaan sadon ja laadun alentumiseen.

Vaikka viljelijöiden tulisi tavoitella taloudellisti optimaalista typpilannoituksen tasoa, usein viljelijät haluavat turvata riittävän typpilannoituksen tason, mikä nostaa todennäköisyyttä taloudellisen tuoton saamiseksi muista tuotannontekijöistä. Käytännössä tämä saattaa johtaa taloudellista optimia korkeampaan typpilannoituksen tasoon. (Jensen & Schjoerring 2011, 43.) Fosforilannoituksen osalta on satovasteiden perusteella laskettu viljojen ja nurmien taloudellisesti optimaalinen fosforilannoitus, joka on nykyisillä hintasuhteilla pienempi kuin ympäristökorvauksen enimmäislannoitusmäärät. Luke on julkaissut viljelijöiden käyttöön fosforilaskurin, jonka avulla on mahdollista arvioida taloudellisesti optimaalista fosforilannoitusta. Viljojen ja nurmien typpilannoituksen osalta vastaavat yhteenvedot on myös tehty (Valkama ym. 2013, 2016), mutta laskuria ei ole julkaistu. (Marttinen ym. 2017, 7.)

Suomen maataloudessa käytettiin vuonna 2016 typpeä lannoitteena yhteensä 228 000 tonnia. Tästä kokonaismäärästä epäorgaanisia lannoitteita oli 65 %. Loput lannoitteena käytetystä typestä oli kierrätysravinteita eli lantaa ja kierrätysravinteita sisältäviä lannoitevalmisteita. (Marttinen ym. 2017, 9.)

Vaikka typpi on kasvintuotannon kannalta tärkeä pääravinne, typpilannoitus aiheuttaa myös vesistöjen rehevöitymistä. Maatalous aiheuttaa Suomessa 52 prosenttia typen kuormasta, joka päätyy Itämereen ihmistoiminnan seurauksena. Vaikka lannoitusmäärät

ovat pienentyneet viimeisten vuosikymmenien aikana, seuranta-aineistossa ei kuitenkaan ole näkyvissä merkkejä maatalouden ravinnekuormituksen vähenemisestä. (Uusitalo ym. 2007, 3.)

Käytännön kasvinviljelyssä peltolohkojen typpitaseet pysyvät yleensä järkevällä tasolla, koska typpilannoituksen käyttöä rajoittaa taloudellinen optimi sekä pienenevät satovasteet tietyn lannoitustason jälkeen. Optimaalisen typpilannoituksen taso vaihtelee vuosittain ja eri lohkojen välillä riippuen kasvuoloista. Erityisesti kasvukauden sääolosuhteet vaikuttavat optimaaliseen typpilannoituksen tasoon, jonka vuoksi kylvöhetkellä on vaikea ennustaa, onko valittu lannoitustaso optimaalinen. (Tapio ym. 2013, 6.) Usein viljojen vuosittaiset satovaihtelut selittyvätkin paremmin vuosien välisillä sääolosuhteiden vaihteluilla kuin lannoitustasojen vaihtelulla (Sihvonen ym. 2018, 16).

Suomessa typpilannoituksen enimmäismäärää sääntelee Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta 1250/2014. Asetus on annettu Euroopan yhteisöjen neuvoston direktiivin (91/676/ETY) perusteella ja sen noudattaminen on pakollista kaikille viljelijöille koko maassa. Asetuksen tavoitteena on vähentää maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien nitraattien pääsyä vesiin ja ammoniakkipäästöjä ilmaan. (VNA 1250/2014). Lisäksi Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelman 2014–2020 mukainen ympäristökorvausjärjestelmä rajoittaa Suomessa typpilannoitteiden käyttöä. Ympäristökorvausjärjestelmään on sitoutunut noin 86 % viljelijöistä ja sitoumusala on noin 90 % käytettävissä olevasta maatalousmaasta (VTA 2018). Ympäristökorvauksen saamisen edellytyksenä olevan ympäristösitoumuksen antanut viljelijä voi käyttää peltohehtaarille typpeä enintään asetuksen liitteissä 2–5 määritellyn määrän. Typpilannoitus on toteutettava lohkokohtaisesti kasvin, maan viljavuuden ja multavuuden sekä satotason perusteella. (VNA 235/2015 11 §.)

Typpitase kertoo kasvustolle annetun ja sadon mukana pellolta pois lähteneen typpimäärän erotuksen. Typpitaseen ollessa 0, kasvukauden aikana annetun typen määrä vas-

taa sadon mukana pellolta poistuneen typen määrää. Pieni typpitaseen lukuarvo merkitsee, että peltoon on jäänyt vain typpeä, joka on altista huuhtoutumiselle. Jos ravinnetase on negatiivinen, pellosta on poistunut enemmän typpeä kuin lannoituksessa on annettu.

Suomen typpitaseet ovat laskeneet kolmenkymmenen vuoden tarkastelujaksolla koko maassa. Suurin syy typpitaseiden pienentymiseen on väkilannoituksen väheneminen. (LUKE 2018). Viljeltyä hehtaaria kohden myytyjen typpilannoitteiden määrä on Suomessa vähentynyt 92 kilogrammasta 75 kilogrammaan vuosina 1995–2015. Samalla hehtaarisadot eivät kuitenkaan ole pienentyneet, mikä tarkoittaa sitä, että ravinnetaseet ovat parantuneet huomattavasti. Ravinnekuormituksen vähentämistavoitteet sekä maatalouden heikko kannattavuus huomioiden kehityssuunta on ollut oikea. Toisaalta hehtaarikohtainen keskiarvo pitää sisällään erilaisia lannoitusmääriä, joiden kuormituspotentiaali on moninkertainen lohkoilla, jotka ovat herkkiä eroosiolle. (Niemi ja Väre 2017, 73.) Ravinnetaseilla mitattuna hehtaarikohtainen typen ylijäämä on laskenut 90 kilogrammasta 50 kilogrammaan. Viime vuosien aikana ylijäämät eivät kuitenkaan ole pienentyneet ja sääolosuhteiltaan vaihtelevat kasvukaudet ovat vaikuttaneet vuosien välisiin eroihin. (LUKE 2018)

Valkama, Salo, Esala ja Turtola (2013a, 9) ovat kevätviljojen typen satovastetta käsittelevässä tutkimuksessa havainneet, että tällä hetkellä Suomessa käytössä olevat typpitaseet, jotka perustuvat viljelijän sato-odotukseen, voivat johtaa merkittäviin virheisiin typpilannoituksessa. Nykyiset typpilannoituksen suositukset ovat taloudellisen optimin kannalta liian korkeita pelloille, joiden typen satovaste on matala. Näillä lohkoilla typpilannoituksen tasoa on mahdollista alentaa 20–75 kg/ha niin, ettei vähennys aiheuta taloudellista tappiota. Toisaalta nykyiset suositukset voivat olla taloudellisen optimin kannalta liian matalia lohkoille, joiden typen satovaste on korkea. Tämä johtaa taloudellisiin tappioihin. (Valkama ym. 2013a, 9)

2.3. Mallasohran viljely

Suomen kasvilajikeluetteloon vuonna 2017 on hyväksyttynä 13 mallasohran viljelyyn suositeltua lajiketta, joista 12 on kaksitahoisia (Suomen kasvilajikeluettelo 2017). Mallasohran viljelyala on laskenut Suomessa 2010-luvulla ollen 75 550 hehtaaria vuonna 2017. Suomen vuosittainen mallasohrasato on vuosina 2010–2017 ollut keskimäärin 333 milj. kg (LUKE, 2018b). Suomessa mallastamoteollisuus käyttää vuosittain mallasohraa yli 100 000 tonnia ja panimoteollisuus käyttää mallastamoiden valmistamaa mallasta noin 55 000 tonnia. Mallasohran kysyntä määräytyy muun muassa kotimaisen oluen kulutuksen sekä maltaan vientitilanteen perusteella. Vuosittaiseen vientiin osoitettuun määrään vaikuttaa mallasohran tuotannon ja mallaslaadun onnistuminen sekä teollisuuden käyttö ja maailmanmarkkinatilanne. Mallasohraa viedään Suomesta markkinatilanteesta riippuen noin 120 000 tonnia vuodessa. (VYR 2012.)

3. Tuotantofunktiot ja taloudellisen optimin määrittäminen

3.1. Tuotantofunktiomuodot

Tuotantofunktio kuvaa suurinta mahdollista tuotosmäärää, joka on mahdollista tuottaa annetulla panosmäärällä (Rasmussen 2010, 13–14). Klassiseen tuotantofunktioon liittyy kaksi oletusta, joista ensimmäinen on panosten ja tuotosten jaettavuus. Mikäli panokset tai tuotokset eivät ole jaettavia, tuotantofunktio kuvaajaa ei ole mahdollista piirtää jatkuvana käyränä. Toisen oletuksen mukaan kaikilla tuotantopanoksilla oletetaan olevan samanlainen tuotantovaikutus eli panokset ja tuotokset ovat homogeenisia. (Doll & Orazem 1984, 30.)

Tuotantofunktio

$$y = f(x)$$

matemaattisesti ilmaistuna kuvaa tuotannon määrää (y) panosmuuttujan (x) suhteen (Rasmussen 2010, 17). Tässä tutkimuksessa tuotoksena on mallasohrasato ja panosmuuttujana typpilannoite.

Tuotantofunktiolle ei ole valmiiksi määriteltyä matemaattista muotoa, vaan kaikki tuotannon kuvaamiseen valitut funktiomuodot ovat historiallisesti perustuneet enemmän tai vähemmän subjektiiviseen valintaan. Funktiomuodon valintaan vaikuttavat funktion alueet, joita halutaan kuvata. (Rasmussen 2010, 17.) Funktiomuodon valinnassa tulee kuitenkin huomioida vähenevän rajatuotoksen laki, jonka mukaan panosmäärän lisääminen aiheuttaa tietyssä pisteestä eteenpäin tuotosmäärän lisäyksen vähenemisen ja lopulta tuotosmäärän lisäys muuttuu negatiiviseksi. (Rasmussen 2010, 13-14.)

Erilaisia malleja viljojen typen satovasteen mallintamiseksi on käsitelty useissa aiemmissa tutkimuksissa. Valkaman, Salon, Esalan ja Turtolan (2013a, 9) kevätviljojen typen satovastetta käsittelevässä tutkimuksessa käytettiin Mitscherlich-funktioon sekä kvadraattiseen tuotantofunktioon perustuvaa mallia. Tutkimuksessa Mitscherlich-funktio

selitti satovastetta paremmin. Mitscherlich-funktioon perustuva malli selitti viljalajista riippuen 25–90 % sadon määrän vaihtelusta.

Bäckmann, Vermeulen ja Taavitsainen (1997, 151) vertailivat kvadraattifunktiota, Mitscherlich-funktiota sekä funktiota tasanteella (LRP-malli) ohran, kauran ja vehnän typen satovasteen kuvaamisessa. Mallien selitysasteet vaihtelivat vain vähän, mutta korkein selitysaste oli ohralla kvadraattifunktioon perustuvalla mallilla. Typpilannoituksen taloudellinen optimi kuitenkin vaihteli funktiomuodosta riippuen. Tutkimuksen päätelmänä todetaan, että mikään edellä mainituista malleista ei ole yksiselitteisesti toista parempi. (Bäckman ym. 1997, 157–159.)

Sumelius (1993, 476–477) vertaili tutkimuksessaan Mitscherlich-funktiota, kvadraattifunktiota sekä neliöjuurifunktiota ohran ja vehnän typen satovasteen mallintamisessa. Tutkimuksen mukaan Mitscherlich-funktio kuvasi parhaiten ohran satovastetta. Tutkimuksessa todetaan, että ennakko-oletuksesta poiketen kvadraattifunktio ei johtanut muihin kahteen funktiomuotoon verrattuna korkeampiin lannoitussuosituksiin. Taloudellisesti optimaalisen lannoitustason optimoinnissa Mitscherlich-funktio johti korkeampiin lannoitussuosituksiin kuin kvadraattifunktio. Korkeimmat lannoitussuositukset antoi neliöjuurifunktio.

Juntti (2003, 24–26) on tutkimuksessaan tarkastellut mallas- ja rehuohran taloudellisesti optimaalista typpilannoituksen tasoa sekä kasvinsuojeluaineiden käytön vaikutusta taloudelliseen optimiin. Tutkimuksessa käytettävä tuotantofunktio on valittu vertailemalla neliöjuuri- ja Mitscherlich-funktioiden selitysastetta ja päädytty käyttämään neliöjuurifunktiota, koska se kuvasi parhaiten mallasohran tuotantofunktiota. Tutkimuksessa on käytetty lineaarista funktiomuotoa kuvattaessa typpilannoituksen vaikutusta sadon valkuaispitoisuuteen.

Cerrato ja Blackmer (1990, 138) ovat tutkimuksessaan vertailleet lineaarista funktiota tasanteella, kvadraattifunktiota tasanteella, kvadraattifunktiota, eksponentiaalifunktiota ja neliöjuurifunktiota maissin typen satovasteen kuvaajina. Tutkimuksen mukaan

kaikki funktiomuodot kuvasivat satovastetta yhtä hyvin selitysasteella mitattuna. Kaikilla funktiomuodoilla tehdyt mallit antoivat myös samoja biologisesti suurimpia satoja, mutta taloudellisesti optimaalisen typpilannoituksen tason osalta funktiomuodot erosivat huomattavasti. Tilastollisten analyysien perusteella kvadraattifunktioon perustuvalla mallilla oli taipumus arvioida taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot liian suurikisi. Parhaiten typen satovastetta maissilla kuvasi kvadraattifunktio tasanteella.

Aiemmissa tutkimuksissa on todettu, että lineaariset funktiot tasanteella voivat kuvata viljojen typen satovastetta yhtä hyvin tai paremmin kuin polynomifunktiot (Lanzer & Paris 1981, 102; Perrin 1976, 60). Lineaarinen funktio tasanteella mahdollistaa vain kaksi taloudellisesti optimaalista lannoitustasoa: ei ollenkaan lannoitusta tai lannoitustason, joka vastaa pistettä tasanteen saavuttamiseksi. Tämä taso riippuu panoksen ja tuotoksen hintasuhteesta ja lineaarisen responssisuoran kaltevuudesta. LRP-malli tuottaa usein matalampia lannoitustasoja kuin kaarevat funktiomuodot, jotka saattavat suosittaa liian suuria lannoitemääriä. Lisäksi LRP-mallin estimoiminen on yksinkertaista. (Perrin 1976, 57.)

Kanadassa tehdyssä tutkimuksessa on tutkittu kylvösiemenen määrän, typpilannoituksen tason sekä lajikkeen vaikutuksia mallasohran satoon ja sadon laatuun. Tutkimuksessa on käytetty typen satovastetta kuvaavana tuotantofunktiona kvadraattifunktiota. Tutkimuksessa on myös huomioitu typpilannoituksen vaikutus sadon proteiinipitoisuuteen. Typpilannoituksen valkuaisvastetta kuvaavana funktiona on käytetty lineaarista funktiota. Tutkimuksessa todetaan eri mallasohralajikkeiden typpilannoituksen valkuaisvasteen eroavan toisistaan. (Donovan ym. 2011, 709, 715.)

Brorsen ja Richter (2012, 50–51) ovat tutkineet, millaisella koejärjestelyllä voidaan estimoida tarkimmin voittoa maksimoiva typpilannoituksen taso, kun funktiomuoto on valmiiksi annettu. Lannoituskokeissa käytetään yleisesti tasavälein määriteltyjä typpilannoituksen tasoja, kuten 0 kg, 40 kg, 80 kg ja 120 kg, kun tuotantofunktiomuoto on etu-

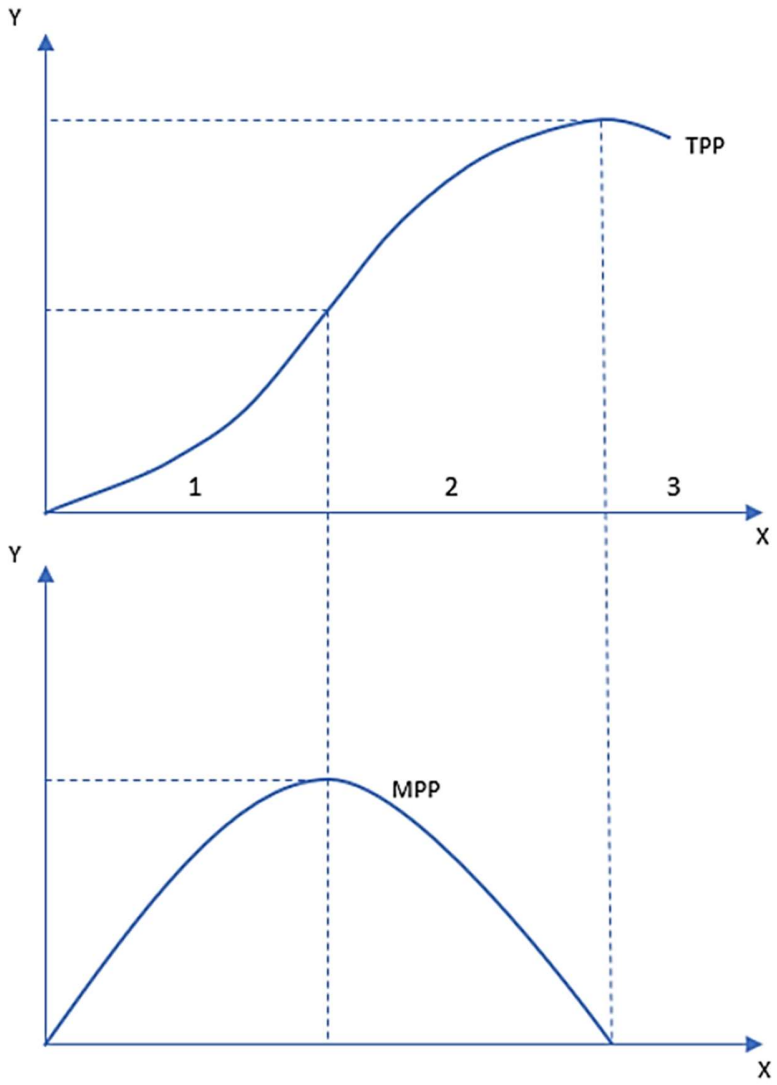
käteen tiedossa. Tutkimuksessa määriteltiin optimaaliset lannoituskokeiden typpilannoitustasot Mitscherlich-funktiolla sekä lineaarisella funktiolla tasanteella. Tutkimuksessa todettiin, että hyöty koejärjestelyn optimaalisten lannoitustasojen käyttämisessä on pieni verrattuna tasavälein määriteltyihin lannoitustasoihin.

3.2. Taloudellisen optimin määrittäminen

Tuotantofunktiosta voidaan johtaa rajatuotos (MPP), joka kuvaa tuotosmäärän muutosta panoskäytön lisääntyessä yhdellä yksiköllä. Rajatuotos voidaan määrittää tuotantofunktion derivaattana. Tämän lisäksi tuotantofunktiosta voidaan määrittää keskimääräinen tuotos APP, joka kuvaa suhdetta jolla panos muuttuu tuotteeksi. (Rasmussen 2010, 19.):

$$MPP = \frac{df(x)}{dx} \tag{3.1}$$

$$APP = \frac{f(x)}{x} = \frac{y}{x} \tag{3.2}$$



KUVIO 2. Klassinen tuotantofunktio (Doll & Orazem 1984, 38).

Klassisen tuotantofunktion oletukseen perustuen tuotantofunktio voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen, jotka on kuvattu kuviossa 2. Alueella 1 rajatuotos (MPP) on suurempi kuin keskimääräinen tuotos. Keskimääräinen tuotos kasvaa alueen 1 loppuun asti, jolloin tuotantoa kannattaa lisätä vähintään alueelle 2 asti. Alueella 2 rajatuotos on laskeva ja vähemmän kuin keskimääräinen tuotos, mutta suurempi kuin nolla. Rationaalisen tuottajan optimaalinen panoskäyttö on alueella 2, mutta tarkka panoskäytön määrä

on mahdollista määritellä vasta kuin panos- ja tuotoshinnat on huomioitu. Alueella 3 panosmäärän lisääminen vähentää tuotosmäärää (TPP) eli rajatuotos on negatiivinen. Tuotanto alueella 3 ei ole järkevää. (Doll & Orazem 1984, 37–39.)

Tuotantoekonomian perusoletus on, että tuottajan tavoitteena on hyödyn maksimointi eli tässä yhteydessä voiton maksimointi. Voitto määritellään tuotettujen tuotteiden sekä tuotannossa käytettyjen tuotannontekijöiden arvon välisenä erotuksena. (Rasmussen 2010, 2.) Tuotantofunktiosta on mahdollista johtaa voittofunktio, joka kuvaa kokonaistuoton (TR) ja kokonaiskustannuksen (TC) erotusta, jolloin voittofunktio voidaan esittää seuraavasti:

$$\pi = TR - TFC = py - wx = pf(x) - wx, \tag{3.3}$$

jossa p kuvaa tuotoshintaa ja w panoshintaa. Voittofunktion maksimi suhteessa x:ään löytyy pisteestä, jossa π:n derivaatta suhteessa x:ään on 0. Tällöin taloudellisesti optimaalinen tuotosmäärä on:

$$p(\frac{df(x)}{dx}) = pMPP = VMP = w, \tag{3.4}$$

jossa VMP on rajatuotos kerrottuna tuotoksen hinnalla. Toisella tavalla esitettynä optimaalisen panoskäytön pisteessä rajatuotos on yhtä suuri kuin panoksen hinta jaettuna tuotoksen hinnalla:

$$MPP = w/p, \tag{3.5}$$

Panosten ja tuotosten hintasuhteilla on vaikutusta tuotannon taloudelliseen optimiin. Jos panoshinta nousee tai tuotoksen hinta laskee, taloudellisesti optimaalinen panoskäyttö laskee. Vastaavasti panosten hintojen laskiessa tai tuotteen hinnan noustessa kannattaa panoskäyttöä lisätä. (Rasmussen 2010, 22–23.)

4. Aineisto ja tutkimusmenetelmät

4.1. Yaran typpilannoituskoeaineisto

Tutkielman aineistona on Yaran Kotkaniemen tutkimusasemalla kerätty mallasohran lannoituskoeaineisto vuosilta 2009–2018. Aineisto ei sisällä ollenkaan lannoituskoetietoja vuodelta 2017. Aineisto sisältää 21 mallasohralajikkeen lannoituskoetiedot. Aineiston lannoituskokeissa on lajikkeesta ja vuodesta riippuen 1–4 kerrannetta ja aineisto sisältää yhteensä 368 havaintoa. Lajikkeiden välistä vertailua hankaloittaa, että kerranteiden määrä vaihtelee ja osasta lajikkeista on havaintoja ainoastaan yhdeltä vuodelta ja toisista lajikkeista havaintoja on useamman vuoden ajalta.

Aineisto sisältää kokeen numerotunnuksen, tiedon koepaikasta sekä lohkotunnuksen ja vuoden. Lannoituskokeissa on käytetty typpilannoituksen tasoja 0, 60, 90, 120,150 sekä 220 kg/ha. Tiettyjen lajikkeiden osalta typpilannoituksen tasona on käytetty 220 kg/ha sijasta 210 kg/ha. Kahdella lajikkeella typpilannoitustasona on käytetty myös 280 kg/ha yhden vuoden osalta. Lannoitteena on käytetty Yara Mila Pellon Y1 -moniravinnelannoitetta.

Lisäksi aineisto sisältää tiedon sadosta (kg/ha), kasvinsuojelusta (on/ei), tuhannen jyvän painosta, hehtolitrapainosta, valkuaispitoisuudesta, lakoprosentista sekä osalla lajikkeista tärkkelyspitoisuudesta ja korren pituudesta. Valtaosassa aineistoin kokeista kasvinsuojelukäsittely on tehty. Viljavuustietojen osalta aineisto sisältää tiedon maalajista, multavuudesta, pH:sta sekä ravinnetiedot seuraavien ravinteiden osalta: Kalsium (Ca), Fosfori (P), Kali (K), Magnesium (Mg), Rikki (S), Boori (B), Kupari (Cu), Mangaani (Mn), Sinkki (Zn). Lannoituskokeissa on käytetty lannoitteena YaraMila Y1 -seoslannoitetta, joka sisältää typen lisäksi fosforia, kaliumia, rikkiä booria sekä seleeniä.

Sadot vaihtelivat aineistossa välillä 386–10 329 kg/ha keskisadon ollessa 5264 kg/ha. Vuosien väliset vaihtelut satotasoissa olivat melko suuria. Lannoituskokeiden koepaikoista suurin osa oli maalajiltaan hiuesavea tai hienoa hietaa. Tutkimuksessa käytettäviä tietoja ovat typpilannoituksen taso, sato (kg/ha) sekä sadon valkuaispitoisuus.

4.2. Tutkimusmenetelmät

Ekonometriset menetelmät, kuten regressioanalyysi, voivat helpottaa päätöksentekoa epävarmuuden vallitessa sekä tarjota suosituksia suunnittelun ja päätöksenteon tueksi. Klassisella lineaarisella regressiomallilla pyritään kuvaamaan kahden tai useamman muuttujan välistä kausaalisuhdetta. (Asteriou & Hall 2007, 24). Tässä tutkimuksessa selittävänä muuttujana on typpilannoitus ja selitettävänä muuttujana mallasohran sato.

Tutkimuksessa estimoidaan mallasohran sadon määrää eri typpilannoitustasoilla ja selvitetään, mikä tuotantofunktiomuoto kuvaa parhaiten typpiresponssia. Aineistoa analysoidaan regressioanalyysilla käyttäen pienimmän neliösumman menetelmää (OLS). Pienimmän neliösumman menetelmässä muodostetaan suora minimoimalla residuaalien neliösumma. Residuaalit ovat havaintopisteiden (y) ja estimaattien ($\hat{y}$) välisiä erotuksia. OLS on yksi eniten käytettyjä ekonometrisia menetelmiä. (Kennedy 2014, 12–13.). Mitscherlich-funktio on epälineaarinen, joten sen estimoimiseen käytetään suurimman uskottavuuden menetelmää (MLE) (Sumelius 1993, 470).

Tutkimuksessa estimoidaan tuotantofunktio käyttäen funktiomuotona kvadraattifunktiota, Mitscherlich-funktiota, neliöjuurifunktiota sekä funktiota tasanteella (LRP). Tutkimuksessa käytettävät funktiomuodot on esitetty alla:

Kvadraattifunktio: $$y = \alpha + \beta_1 X + \beta_2 X^2, \quad (4.1)$$

Mitscherlich-funktio: $$y = m(1 - ke^{-\beta X}), \quad (4.2)$$

Neliöjuurifunktio: $$y = \alpha + \beta_1 X + \beta_2 X^{\frac{1}{2}}, \quad (4.3)$$

Lineaarinen funktio ja tasanne (LRP-malli): $$y = \alpha + \beta_1 X, \text{jos } X < C, \quad (4.4)$$

$$y = P, \text{jos } X \geq C$$

Tutkimus aloitetaan estimoimalla tuotantofunktiot koko lannoituskoeaineistosta edellä mainittuja funktiomuotoja käyttäen. Eri funktiomuotoihin perustuvia mallasohran typen satovastetta kuvaavia malleja arvioidaan mallien selitysasteen avulla. Selitysaste kuvaa, miten suuri osa selitettävän muuttujan (sato) vaihtelusta tulee mallin avulla kuvatuksi (Asteriou & Hall 2016, 38). Kaksi mallia eivät ole sisäkkäisiä silloin, kun toista ei voida kuvata toisen mallin lineaarikombinaationa. Tällöin on kyse non-nested -malleista, joiden vertaamiseen voidaan tarvita J-testiä. (Kennedy 2014, 77–78). Non-nested -malleja voidaan vertailla myös Akaiken informaatiokriteerien (AIC) (Akaike 1974) tai Bayesian informaatiokriteerien (BIC) (Schwarzt 1978) perusteella. BIC-testisuure perustuu informaatioteoriaan ja sisältää oletuksen, jonka tavoitteena on, että valittavassa mallissa katoaa mahdollisimman vähän informaatiota. BIC-testisuureen avulla pystytään arvioimaan, mikä estimoitu malli kuvaa parhaiten aineistossa olevaa vaihtelua. BIC-kriteerien perusteella malleista tulee valita se, jonka BIC-testisuure on pienin. (Fabozzi ym. 2014.)

Tuotantofunktioiden estimoinnissa käytetään myös dummy-muuttujia sisältäviä malleja. Dummy-muuttuja on muuttuja, joka saa arvon yksi, kun ilmiö esiintyy ja muutoin arvon nolla (Kennedy 2014, 232). Dummy-muuttujia voidaan käyttää esimerkiksi kausivaihtelun huomioimiseen regressioanalyysissa (Asteriou & Hall 2016, 184). Tässä tutkimuksessa dummy-muuttujia käytetään eri vuosien sekä eri lajikkeiden välisen satotasoeron huomioimisessa.

Käytännössä suomalaisilla viljelmillä lannoitepanoksen käyttö perustuu yleensä viljavuustutkimuksen tuloksiin. Viljavuustutkimukset suosittavat yleensä seoslannoitteiden

käyttöä, jolloin lannoitepanosten (typpi, fosfori ja kalium) käyttösuhde on vakio ja multikollineaarisuus täydellistä. (Ryhänen 1996, 12). Täydellisen multikollinearisuuden vallitessa toinen muuttuja on mahdollista ilmaista toisen muuttujan lineaarifunktiona. Multikollineaarisuus johtaa estimaattien suureen varianssiin, jolloin regressiokertoimet ovat epätarkkoja. (Kennedy 2014, 193). Tutkimusaineiston lannoituskokeissa on käytetty seoslannoitetta, jolloin multikollinearisuuden välttämiseksi selittävänä muuttujana käytettään ainoastaan typpilannoitusta. Lisäksi oletetaan, että muiden ravinteiden saatavuus on turvattu.

Tutkimuksessa huomioidaan myös typpilannoituksen vaikutus sadon valkuaispitoisuuteen, koska mallasohran peruslaadun valkuaispitoisuuden enimmäismäärä on 11,5 %. Myös typen vaikutusta sadon valkuaispitoisuuteen tutkitaan regressioanalyysin avulla ja määritellään suurin mahdollinen typpilannoitustaso, jolloin valkuaispitoisuus ei nouse liian korkeaksi. Typen valkuaisvasteen funktiomuotona käytetään lineaarista funktiota, kvadraattifunktiota tai neliöjuurifunktiota. Aiemmin kerrotun mukaisesti myös sadon jyväkoko vaikuttaa siihen kelpaako ohrasato mallasohraksi. Aineisto ei kuitenkaan sisällä tietoa sadon jyväkoosta, joten sitä ei huomioida tutkimuksessa.

Tutkimuksessa ei lähtökohtaisesti huomioida ympäristökorvauksen asettamia typpilannoituksen enimmäismääriä. Tutkimuksessa etsitään ensin taloudellisesti optimaalinen typpilannoituksen taso ilman ympäristökorvauksen typpilannoituksen enimmäismäärien aiheuttamaa rajoitetta ja sen jälkeen tarkastellaan onko määritetty optimi alle rajoitteen. Tutkimuksessa tarkastellaan myös millainen katetuoton ero syntyy ilman rajoitetta ja rajoitteen mukaan määritetyn optimaalisen typpilannoituksen tason välillä. Ympäristökorvauksen asettama raja typpilannoitukselle vaihtelee maan multavuudesta riippuen 80-100 kg/ha, kun ei huomioida eloperäisiä maita. Lisäksi typpilannoituksen tasoa on mahdollista nostaa edellä mainituista rajoista saavutettu satotaso huomioiden 0-50 kg hehtaarille. (VNA 235/2015). Eri lajikkeiden satotasot vaihtelevat, mutta esimerkiksi satotason ollessa 5500 kg/ha typpilannoituksen enimmäismäärä on 130 kg/ha. Mallasoh-

ran viljelysuosituksissa typpilannoituksen tasoksi on suositeltu 100 kg /ha kivennäismailla ja eloperäisillä ja runsasmultaisimmilla mailla pienempää typpilannoituksen tasoa (VYR 2012).

Tutkimuksessa on tarkoitus myös selvittää, miten mallasohran ja typpilannoitteiden hintavaihtelu vaikuttaa taloudellisesti optimaalisen lannoituksen tasoon. Tutkimuksessa tehdään herkkyysanalyysiä asettamalla lannoitteen ja mallasohran hinta tutkimuksessa määritellystä keskiarvohinnasta poikkeavaksi. Tutkimuksessa käytetään mallasohran vertailuhintana Luonnonvarakeskuksen tilastokannasta saatavaa vuosien 2010—2017 mallasohran vuosittaista keskimääräistä hintaa. Lannoitteen hintana käytetään YaraMila Y1 -lannoitteen keskihintaa vuodelta 2017, josta on johdettu vuosien 2009—2017 vuosikohtaiset keskihinnat käyttämällä Tilastokeskuksen NPK-lannoitteiden hintaindeksiä. Tutkimuksessa käytetään seoslannoitteen hintaa, koska myös lannoituskokeissa käytetty lannoite on ollut seoslannoite, jolloin saavutetun satotaston edellytyksenä on myös muiden ravinteiden kuin typen saatavuus. Lannoitteen hinnassa on huomioitu rahti ja mallasohran hinnassa on huomioitu viljan kuivatuskustannus sekä rahti. Rahdin hintana on käytetty 15 €/t ja viljan kuivatuskustannuksena 14 €/t (ProAgria Tuottopuntari, 2019).

5. Tulokset

5.1. Tuotantofunktioiden estimointi ja vertailu

Tutkimus aloitettiin estimoimalla tuotantofunktiot koko aineistosta, jolloin lajike- tai vuosikohtaisia eroja ei huomioitu. Neliöjuurifunktion estimoinnissa havaittiin, että yksi funktion kertoimista ei ollut merkitsevä. Myöhemmin taloudellisesti optimaalista typpilannoitustasoa tarkasteltaessa havaittiin neliöjuurifunktion antavan muita funktiomuotoja merkittävästi korkeampia optimaalisia lannoitustasoja. Tämän vuoksi neliöjuurifunktioon päätettiin lisätä toisen asteen termi. Tässä estimoidussa mallissa neliöjuuritermi ei kuitenkaan ole merkitsevä, joten mallin mukaisia lannoitussuosituksia ei voi pitää luotettavina. Estimoidut mallit on kuvattu taulukoissa 2–5.

Studentin t-testin mukaan kaikkien muiden estimoitujen mallien parametrien estimaatit olivat tilastollisesti merkitseviä merkitsevyystasolla $\alpha = 0{,}001$ eli 0,1 % riskillä.

F-testisuure kertoo, onko koko mallilla tilastollista merkitsevyyttä. Estimoitujen mallien F-testisuure on merkitsevä kvadraattifunktiolla ja neliöjuurifunktiolla merkitsevyystasolla $\alpha = 0{,}025$. Näin ollen edellä mainitut regressiomallit sopivat hyvin aineiston havainnointiin. LRP-mallin ja Mitscherlich-funktion osalta F-testisuuretta ei määritetty.

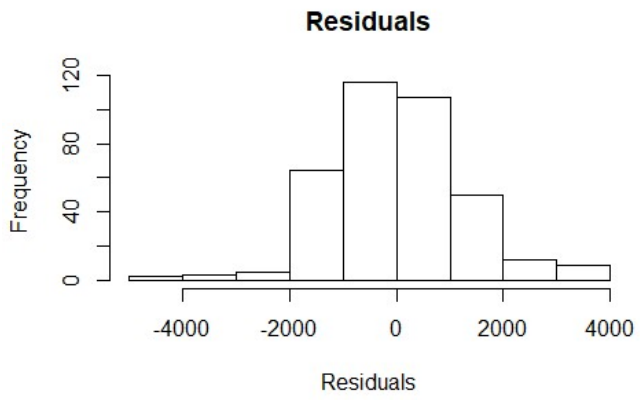
Mallien heteroskedastisuutta arvioitiin Breusch-Pagan testillä. Breusch-Pagan -testissä nollahypoteesi H_0 on, että heteroskedastisuutta ei esiinny ja vaihtoehtoishypoteesi H_1, että mallissa esiintyy heteroskedastisuutta. Kvadraattifunktiolla, toisen asteen termin sisältävällä neliöjuurifunktiolla sekä kvadraattifunktiolla dummy-muuttujilla määritetty testisuure on merkitsevä, koska taulukossa 1 esitetyt p-arvot ovat pieniä. Tällöin hylkäämme nollahypoteesin H_0 ja vaihtoehtoishypoteesi H_1 astuu voimaan eli malleissa esiintyy heteroskedastisuutta. Mitscherlich-funktioon perustuvat mallit on estimoitu MLE-menetelmällä, joka perustuu selitettävän muuttujan y todennäköisyysjakaumaan eikä residuaalien neliösummaan, joten heteroskedastisuusongelmaa ei ole. Residuaaleja

on tarkasteltu graafisesti kuvioissa 1 ja 2 LRP-mallin osalta ja ne näyttävät noudattavan normaalijakaumaa melko hyvin. Tällöin myöskään LRP-mallissa ei ole ongelmaa heteroskedastisuuden suhteen. Mallin ollessa heteroskedastinen kertoimien estimaatit ovat harhattomia, mutta t- ja F-testisuureisiin ei voi luottaa.

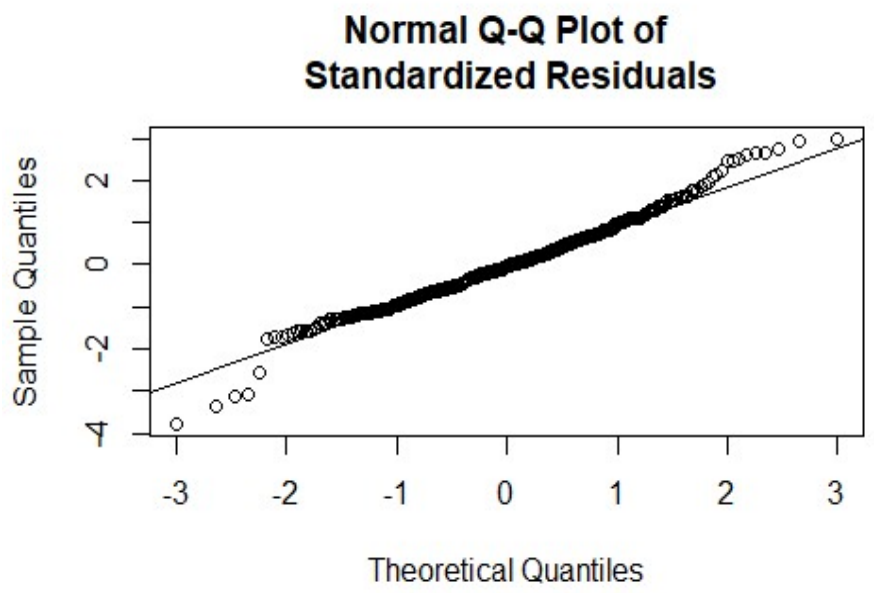
Mallien autokorrelaatiota arvioitiin Breusch-Godfrey -testillä. Breusch-Godfrey testissä nollahypoteesi H_0 on, että autokorrelaatiota ei esiinny ja vaihtoehtoishypoteesi H_1, että mallissa esiintyy autokorrelaatiota. Kvadraattifunktiolla, toisen asteen termin sisältävällä neliöjuurifunktiolla sekä kvadraattifunktiolla vuosittaisilla ja lajikekohtaisilla dummy-muuttujilla määritetty testisuure on merkitsevä, koska taulukossa 1 esitetyt p-arvot ovat hyvin pieniä. Tällöin hylkäämme nollahypoteesin H_0 ja vaihtoehtoishypoteesi H_1 astuu voimaan eli malleissa esiintyy autokorrelaatiota. Autokorrelaatio ei aiheuta estimoinnissa ongelmaa, koska estimointia varten aineisto on mahdollista järjestää satunnaisesti.

TAULUKKO 1. Eri funktiomuotoihin perustuvien tuotantofunktiomallien regression Breusch-Pagan sekä Breusch-Godfrey -testien p-arvot.

funktiomuoto	**Breusch-Pagan -testi, p-arvo**	**Breusch-Godfrey -testi, p-arvo**
kvadraattifunktio	0.009	< 0,001
neliöjuurifunktio + toisen asteen termi	0.020	< 0,001
kvadraattifunktio (sis. vuosidummyt	< 0,001	< 0,001
kvadraattifunktio (sis. lajikedummyt	< 0,001	< 0,001



KUVIO 3. LRP-mallin residuaalit.



KUVIO 4. Standardisoitujen residuaalien teoreettisten ja otoksen kvantiilien vastaavuus.

TAULUKKO 2. Kvadraattifunktioon perustuvan tuotantofunktiomallin estimoinnin tulokset.

Malli: $\mathbf{y = \alpha + \beta_1 x + \beta_2 x^2}$

```
Residuaalit:
    Min      1Q  Mediaani    3Q     Max
-4520.0  -805.8   -49.5   693.8  3503.0

                  Kertoimet   Keskivirhe t-suure tod. näk.(>|t|)
α                 2428.206    148.257    16.378  < 2e-16 ***
β1                  40.535      2.802    14.462  < 2e-16 ***
β2                  -0.092      0.011    -7.798 6.66e-14 ***

merkitsevyys:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residuaalien keskivirhe: 1229, 365 vapausasteella
Selitysaste:  0.591,   Vapausasteilta korjattu selitysaste:  0.589
F-suure: 263.9, 2 ja 365 vapausteilla,  p-arvo: < 2.2e-16
```

TAULUKKO 3. Toisen asteen termin sisältävään neliöjuurifunktioon perustuvan tuotantofunktiomallin estimoinnin tulokset.

Malli: $\mathbf{y = \alpha + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^{1/2}}$

```
Residuaalit:
    Min      1Q  Mediaani    3Q     Max
-4469.3  -813.8   -26.9   676.0  3553.7

                   Kertoimet  Keskivirhe t-suure  tod. näk.(>|t|)
α                 2389.143    157.392    15.180   <2e-16 ***
β1                  30.104     14.319     2.102   0.0362 *
β2                  -0.070      0.032    -2.188   0.0293 *
β3                  86.075    115.871     0.743   0.4580
---
merkitsevyys:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residuaalien keskivirhe: 1230, 364 vapausasteella
Selitysaste:  0.592,   Vapausasteilta korjattu selitysaste:0.588
F-suure: 175.9, 3 ja 364 vapausastetta,  p-arvo: < 2.2e-16
```

TAULUKKO 4. LRP-malliin perustuvan tuotantofunktion estimoinnin tulokset.

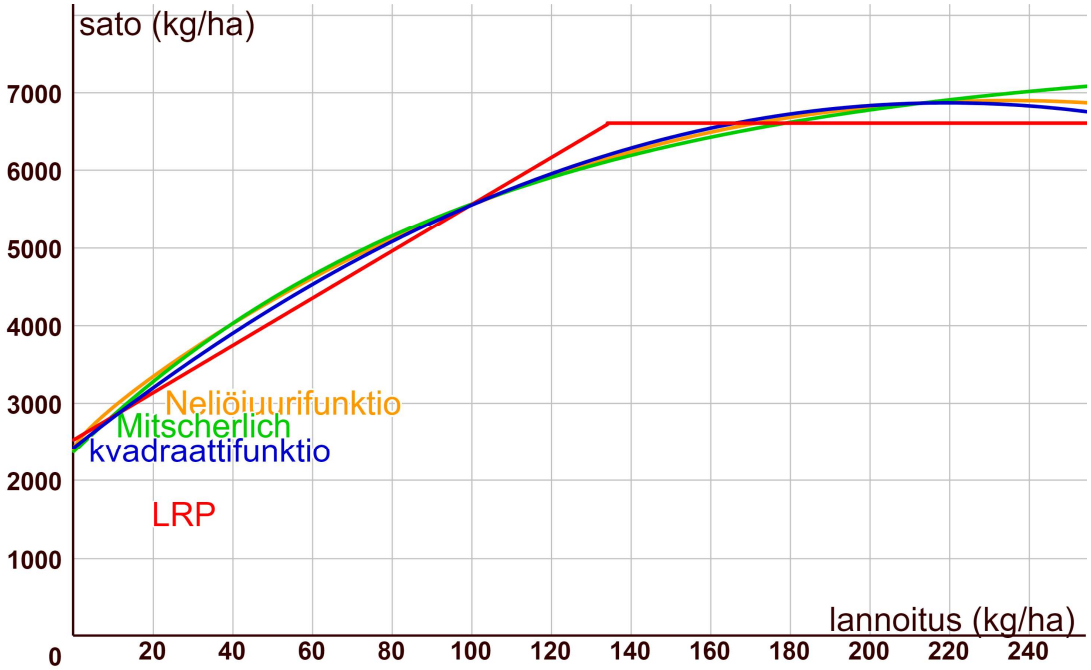
Malli: $\mathbf{y} = \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\beta_1}\mathbf{x}$, jos $x < c$ $\mathbf{y} = \mathbf{P}$, jos $x \geq C$

```
    Kertoimet  Keskivirhe t-suure  tod. näk.(>|t|)
α    2532.884    145.259   17.44   <2e-16 ***
β1     30.321      1.798   16.86   <2e-16 ***
C     134.532      6.030   22.31   <2e-16 ***
---
merkitsevyys:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residuaalien keskivirhe: 1246 on 365 degrees of freedom

Iteraatioiden lukumäärä: 3
Saavutettu iteraatioiden tarkkuus: 9.221e-10


Pseudoselitysaste:
                            Pseudoselitysaste
McFadden                            0.048
Cox and Snell (ML)                  0.579
Nagelkerke (Cragg and Uhler)        0.579

Log likelihood -testi:
 Df.diff LogLik.diff  Chisq    p-arvo
      -2     -159.39 318.77 6.0174e-70
```

TAULUKKO 5. Mitscherlich-funktioon perustuvan tuotantofunktion estimoinnin tulokset.

Malli: $\mathbf{y = m\,(1 - ke^{-\beta x})}$

```
  Kertoimet  Keskivirhe t-suure   tod. näk.(>|t|)
m      7524  3.451e+02  21.800  < 2e-16 ***
k     0.684  2.222e-02  30.801  < 2e-16 ***
β     0.009  1.443e-03   6.714 7.27e-11 ***
---
merkitsevyys:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residuaalien keskivirhe: 1229, 365 vapausastetta

Iteraatioiden lukumäärä: 4
Saavutettu iteraatioiden tarkkuus 8.696e-06


                            Pseudoselitysaste
McFadden                            0.050
Cox and Snell (ML)                  0.591
Nagelkerke (Cragg and Uhler)        0.591

Log likelihood -testi:
 Df.diff LogLik.diff  Chisq    p-arvo
      -2     -164.69 329.38 2.9984e-72

Havaintojen lukumäärä: 368
```



KUVIO 5. Kvadraattifunktioon, Mitscherlich-funktioon, toisen asteen termin sisältävään neliöjuurifunktioon ja LRP-malliin perustuvien mallien funktioiden kuvaajat.

Kuviosta 5 havaitaan, että estimoitujen mallien funktioiden kuvaajien väliset erot ovat hyvin pieniä. Tällöin voidaan myös olettaa, että erot lannoitusoptimien välillä eivät todennäköisesti ole kovin suuria.

LRP-mallista ja Mitscherlich-funktioon perustuvasta mallista on määritetty Nagelkerken pseudoselitysaste, koska PNS:ä vastaavan R^2-selitysasteen määrittäminen ei ollut mahdollista funktioiden ollessa epälineaarisia parametrien suhteen. Selitysaste ei millään funktiomuodolla ollut kovin korkea. Lisäksi eri funktiomuotojen selitysasteiden väliset erot olivat hyvin pieniä. Muuttujien määrän huomioivat korjatut selitysasteet olivat kvadraattifunktiolla ja toisen asteen termin sisältävällä neliöjuurifunktiolla vain hieman pienempiä kuin korjaamattomat selitysasteet. Kvadraattifunktion sekä toisen asteen termin sisältävän neliöjuurifunktion selitysasteet sekä LRP-mallin ja Mitscherlich-funktion pseudoselitysasteet on kuvattu alla olevassa taulukossa. Edellä estimoitujen tuotantofunktioiden selitysasteet sekä pseudoselitysasteet on kuvattu taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Eri funktiomuotoihin perustuvien tuotantofunktioiden regressioiden selitysaste sekä pseudoselitysaste.

	R^2	Nagelkerke R^2
kvadraattifunktio	0,591	-
neliöjuurifunktio + toisen asteen termi	0,592	-
LRP	-	0,579
Mitscherlich -funktio	-	0,591

Estimoituja malleja arvioitiin myös BIC (Bayesian information criteria) -testisuureen avulla, koska Mitscherlich-funktio on non nested -malli eli sitä ei ole mahdollista esittää muiden mallien lineaarikombinaationa. BIC-testisuureen perusteella parhaiten datan kokonaisvaihtelua selittävä malli on Mitscherlich-funktioon perustuva malli, mutta ero kvadraattifunktioon perustuvaan malliin on erittäin pieni. Eri tuotantofunktiomuotoihin perustuvien mallien BIC-testisuureet on kuvattu taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Eri funktiomuotoihin perustuvien tuotantofunktioiden regressioiden BIC-testisuure.

	BIC-testisuure
kvadraattifunktio	6300,8
neliöjuurifunktio + toisen asteen termi	6306,1
LRP-malli	6311,2
Mitscherlich -funktio	6300,5

Kvadraattifunktioon sekä Mitscherlich-funktioon perustuviin malleihin lisättiin vuosittaiset dummy-muuttujat, jolloin saatiin estimoitua taulukoissa 8 ja 9 kuvatut tuotantofunktiot. Dummy-muuttujat lisäämällä estimoiduissa malleissa pystyttiin huomioimaan sadon vaihtelu vuosittain. Koska aineisto käsitti havaintoja yhdeksältä vuodelta, dummy-

muuttujia on 8 kappaletta. Toisen asteen termiä sisältävää neliöjuurifunktiota ei enää sisällytetty tarkasteluun, koska aiemmassa estimoinnissa neliöjuuritermin kerroin ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Parametrien a, b ja c estimaatit olivat edelleen merkitseviä molemmilla funktiomuodoilla merkitsevyystasolla α = 0,001 eli 0,1 % riskillä.

TAULUKKO 8. Vuosittaiset dummy-muuttujat sisältävään kvadraattifunktioon perustuvan tuotantofunktion estimoinnin tulokset

Malli: $\mathbf{y = \alpha + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \delta_1 D_{2011} + \delta_2 D_{2012} + \delta_3 D_{2013} + \delta_4 D_{2014} + \delta_5 D_{2015} + \delta_6 D_{2016} + \delta_7 D_{2018}}$

```
Residuaalit:
    Min      1Q  Mediaani    3Q     Max
-3321.5  -643.1    -4.1   751.3  2635.4

                   Kertoimet  Keskivirhe t-suure  tod. näk.(>|t|)
α                 2028.472    193.019    10.509  < 2e-16 ***
β1                  40.664      2.440    16.665  < 2e-16 ***
β2                  -0.093      0.010    -8.990  < 2e-16 ***
δ1                -803.883    247.910    -3.243 0.001296 **
δ2                 128.817    206.274     0.624 0.532703
δ3                 818.416    217.431     3.764 0.000195 ***
δ4                 748.347    198.488     3.770 0.000191 ***
δ5                -188.193    234.858    -0.801 0.423486
δ6                1503.333    217.437     6.914 2.18e-11 ***
δ7                 -51.749    343.791    -0.151 0.880435
δ8                 305.322    326.266     0.936 0.350006
---
Merkitsevyys:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residuaalien keskivirhe: 1065, 357 vapausasteella
Selitysaste:  0.700,   vapausasteilta korjattu selitysaste:  0.691
F-suure: 83.13,  10 ja 357 vapausastetta,  p-arvo: < 2.2e-16
```

TAULUKKO 9. Vuosittaiset dummy-muuttujat sisältävään Mitscherlich-funktioon perustuvan tuotantofunktion estimoinnin tulokset.

Malli: $\mathbf{y = m\,(1 - ke^{\beta x}) + \delta_1 D_{2011} + \delta_2 D_{2012} + \delta_3 D_{2013} + \delta_4 D_{2014} + \delta_5 D_{2015} + \delta_6 D_{2016} + \delta_7 D_{2018}}$

	Kertoimet	Keskivirhe	t-suure	tod. näk.(>|t|)	
m	7133	3.336e+02	21.381	< 2e-16	***
k	0.722	2.441e-02	29.575	< 2e-16	***
β	0.009	1.254e-03	7.730	1.11e-13	***
δ_1	-801.1	2.479e+02	-3.232	0.001344	**
δ_1	126.0	2.062e+02	0.611	0.541524	
δ_1	816.1	2.174e+02	3.754	0.000203	***
δ_1	745.3	1.985e+02	3.755	0.000202	***
δ_1	-192.8	2.348e+02	-0.821	0.412090	
δ_1	1499	2.174e+02	6.894	2.48e-11	***
δ_1	-56.39	3.437e+02	-0.164	0.869795	
δ_1	205.1	3.244e+02	0.632	0.527617	

---
merkitsevyys: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residuaalien keskivirhe: 1065, 357 vapausasteella

	Pseudoselitysaste
Nagelkerke (Cragg and Uhler)	0.699

Iteraatioiden lukumäärä: 5
Saavutettu iteraatioiden tarkkuus: 3.578e-07

Taulukossa 10 on esitetty estimoitujen vuosikohtaiset dummy-muuttujat sisältävien mallien selitysaste, pseudoselitysase sekä BIC-testisuure. Vuosittaisten dummy-muuttujien lisääminen paransi kvadraattifunktioon perustuvan mallin selitysastetta sekä Mitscherlich-funktioon perustuvan mallin pseudoselitysastetta. BIC -testisuureen arvot pienenivät myös molemmilla funktiomuodoilla. Paremmin mallien kokonaisvaihtelua selittää kvadraattifunktio.

TAULUKKO 10. Vuosittaiset dummymuttujat sisältävien tuotantofunktiomallien selitysaste, pseudoselitysaste sekä BIC-testisuure.

	R^2	Nagelkerke R^2	BIC
kvadraattifunktio	0,700	-	6234,7
Mitscherlich -funktio		0,699	6234,6

Aineistosta estimoitiin mallit myös käyttäen lajikekohtaisia dummy-muuttujia, jolloin oletetaan typpiresponssin funktiomuodon olevan sama eri lajikkeilla satotason vaihdellessa lajikkeiden välillä. Aineisto sisältää havaintoja 19 eri lajikkeen osalta, joten lajikekohtaisia dummy-muuttujia on yhteensä 18 kappaletta. Mallit estimoitiin edelleen käyttäen kvadraattifunktiota sekä Mitscherlich-funktiota eikä toisen asteen termin sisältävää neliöjuurifunktiota sisällytetty tarkasteluun. Estimoidut mallit on esitetty alempana. Kvadraattifunktioon perustuvassa mallissa vakiotermin a merkitsevyystaso oli $\alpha = 0{,}05$ eli kerroin oli merkitsevä 5 % riskillä. Molempiin funktiomuotoihin perustuvien mallien muut kertoimet olivat merkitseviä merkitsevyystasolla $\alpha = 0{,}001$ eli 0,1 % riskillä.

TAULUKKO 11. Lajikekohtaiset dummy-muuttujat sisältävään kvadraattifunktioon perustuvan tuotantofunktion estimoinnin tulokset.

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\beta}_1\mathbf{x} + \boldsymbol{\beta}_2\mathbf{x}^2 + \boldsymbol{\delta}_1\boldsymbol{D}_{Cropton} + \boldsymbol{\delta}_2\boldsymbol{D}_{Barke} + \boldsymbol{\delta}_3\boldsymbol{D}_{Dragoon} + \boldsymbol{\delta}_4\boldsymbol{D}_{Evergreen} + \boldsymbol{\delta}_5\boldsymbol{D}_{Fairing} + \boldsymbol{\delta}_6\boldsymbol{D}_{Fealty} + \boldsymbol{\delta}_7\boldsymbol{D}_{Harbinger} + \boldsymbol{\delta}_7\boldsymbol{D}_{Iron} + \boldsymbol{\delta}_7\boldsymbol{D}_{Kombaredu} + \boldsymbol{\delta}_7\boldsymbol{D}_{Laureate} + \boldsymbol{\delta}_7\boldsymbol{D}_{Melius} + \boldsymbol{\delta}_7\boldsymbol{D}_{NOS\ 111.429-59} + \boldsymbol{\delta}_7\boldsymbol{D}_{Posada} + \boldsymbol{\delta}_7\boldsymbol{D}_{Propino} + \boldsymbol{\delta}_7\boldsymbol{D}_{Publican} + \boldsymbol{\delta}_7\boldsymbol{D}_{Rosalina} + \boldsymbol{\delta}_7\boldsymbol{D}_{Soulmate} + \boldsymbol{\delta}_7\boldsymbol{D}_{Trekker}$$

Residuaalit:

Min	1Q	Mediaani	3Q	Max
-3946.7	-682.3	16.8	747.7	3636.9

	Kertoimet	Keskivirhe	t-suure	tod. näk.(>|t|)	
α	1198.769	470.975	2.545	0.011351	*
β_1	40.748	2.553	15.956	< 2e-16	***
β_2	-0.093	0.010	-8.629	2.26e-16	***
$\delta_{Cropton}$	525.120	508.801	1.032	0.302756	
δ_{Barke}	862.500	557.346	1.548	0.122651	
$\delta_{Dragoon}$	2600.166	557.346	4.665	4.41e-06	***
$\delta_{Evergreen}$	857.000	557.346	1.538	0.125047	
$\delta_{Fairing}$	1954.500	557.346	3.507	0.000513	***
δ_{Fealty}	1791.750	557.346	3.215	0.001428	**
$\delta_{Harbinger}$	972.000	557.346	1.744	0.082048	.
δ_{Iron}	1551.708	508.785	3.050	0.002466	**
$\delta_{Kombaredu}$	892.197	621.581	1.435	0.152083	
$\delta_{Laureate}$	2308.888	525.471	4.394	1.48e-05	***
δ_{Melius}	1315.791	508.785	2.586	0.010112	*
$\delta_{NOS\ 111.429-59}$	1377.482	621.581	2.216	0.027333	*
δ_{Posada}	1837.041	508.785	3.611	0.000350	***
$\delta_{Propino}$	648.164	475.311	1.364	0.173558	
$\delta_{Publican}$	891.135	491.540	1.813	0.070704	.
$\delta_{Rosalina}$	1202.166	557.346	2.157	0.031696	*
$\delta_{Soulmate}$	1499.250	508.785	2.947	0.003429	**
$\delta_{Trekker}$	1406.500	508.785	2.764	0.006007	**

merkitsevyys: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residuaalien keskivirhe: 1115, 347 vapausasteella
Selitysaste: 0.680, Vapausasteilta korjattu selitysaste: 0.662
F-suure: 36.9, 20 ja 347 vapausastetta, p-arvo: < 2.2e-16

TAULUKKO 12. Lajikekohtaiset dummy-muuttujat sisältävään Mitscherlich-funktioon perustuvan tuotantofunktion estimoinnin tulokset.

Malli: $\mathbf{Y = m\,(1 - ke^{\beta x})} + \boldsymbol{\delta_1 D_{Cropton}} + \boldsymbol{\delta_2 D_{Barke}} + \boldsymbol{\delta_3 D_{Dragoon}} + \boldsymbol{\delta_4 D_{Evergreen}} + \boldsymbol{\delta_5 D_{Fairing}} + \boldsymbol{\delta_6 D_{Fealty}} + \boldsymbol{\delta_7 D_{Harbinger}} + \boldsymbol{\delta_7 D_{Iron}} + \boldsymbol{\delta_7 D_{Kombaredu}} + \boldsymbol{\delta_7 D_{Laureate}} + \boldsymbol{\delta_7 D_{Melius}} + \boldsymbol{\delta_7 D_{NOS\ 111.429-59}} + \boldsymbol{\delta_7 D_{Posada}} + \boldsymbol{\delta_7 D_{Propino}} + \boldsymbol{\delta_7 D_{Publican}} + \boldsymbol{\delta_7 D_{Rosalina}} + \boldsymbol{\delta_7 D_{Soulmate}} + \boldsymbol{\delta_7 D_{Trekker}}$

	Kertoimet	Keskivirhe	t-suure	tod. näk.(>|t|)	
α	6295	5.494e+02	11.458	< 2e-16	***
β_1	0.817	6.261e-02	13.053	< 2e-16	***
β_1	0.010	1.315e-03	7.394	1.08e-12	***
$\delta_{Cropton}$	534.5	5.089e+02	1.050	0.294260	
δ_{Barke}	862.5	5.574e+02	1.547	0.122709	
$\delta_{Dragoon}$	2600	5.574e+02	4.665	4.42e-06	***
$\delta_{Evergreen}$	857.0	5.574e+02	1.537	0.125106	
$\delta_{Fairing}$	1954	5.574e+02	3.506	0.000514	***
δ_{Fealty}	1792	5.574e+02	3.214	0.001430	**
$\delta_{Harbinger}$	972.0	5.574e+02	1.744	0.082096	.
δ_{Iron}	1552	5.089e+02	3.049	0.002470	**
$\delta_{Kombaredu}$	795.4	6.207e+02	1.281	0.200942	
$\delta_{Laureate}$	2309	5.256e+02	4.393	1.49e-05	***
δ_{Melius}	1316	5.089e+02	2.586	0.010124	*
$\delta_{NOS\ 111.429-59}$	1281	6.207e+02	2.063	0.039848	*
δ_{Posada}	1837	5.089e+02	3.610	0.000351	***
$\delta_{Propino}$	653.3	4.754e+02	1.374	0.170252	
$\delta_{Publican}$	897.4	4.916e+02	1.825	0.068795	.
$\delta_{Rosalina}$	1202	5.574e+02	2.157	0.031722	*
$\delta_{Soulmate}$	1499	5.089e+02	2.946	0.003434	**
$\delta_{Trekker}$	1406	5.089e+02	2.764	0.006015	**

---

merkitsevyys: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residuaalien keskivirhe: 1115, 347 vapausasteella

	Pseudoselitysaste
Nagelkerke (Cragg and Uhler)	0.680

Iteraatioiden lukumäärä: 5
Saavutettu iteraatioiden tarkkuus: 3.99e-07

Taulukossa 13 on esitetty estimoitujen lajikekohtaiset dummy-muuttujat sisältävien tuotantofunktiomallien selitysaste, pseudoselitysase sekä BIC-testisuure. Lajikekohtaisten dummy-muuttujien lisääminen paransi kvadraattifunktioon perustuvan mallin selitysastetta sekä Mitscherlich-funktioon perustuvan mallin pseudoselitysastetta. Molempien

mallien selitysasteet ja BIC-testisuureet ovat hyvin lähellä toisiaan. Vuosivaihtelun huomioivan dummy-muuttujat sisältävän mallin BIC-testisuure on kuitenkin pienempi kuin lajikevaihtelun huomioivassa dummy-muuttujat sisältävässä mallissa, joten vuosivaihtelun huomioiva malli selittää sadon kokonaisvaihtelua paremmin.

TAULUKKO 13. Lajikekohtaiset dummy-muuttujat sisältävien tuotantofunktiomallien selitysaste, pseudoselitysaste sekä BIC-testisuure.

	R^2	Nagelkerke R^2	BIC
kvadraattifunktio	0,680	-	6316,7
Mitscherlich -funktio		0,680	6316,8

5.2. Typpilannoituksen optimin määrittäminen

Tarkastelu aloitettiin määrittelemällä eri tuotantofunktioille biologisesti optimaaliset lannoitusmäärät. Biologinen typpioptimi määritettiin ratkaisemalla tuotantofunktioiden derivaatan nollakohdat. Biologisesti optimaalinen satotaso ratkaistiin sijoittamalla biologisesti optimaalinen typpilannoitusmäärä tuotantofunktioon. Biologisen optimin ratkaiseminen oli valituista funktiomuodoista johtuen mahdollista ainoastaan kvadraattifunktion osalta, koska maksimisatoa lähestytään ainoastaan asymptoottisesti. Biologiset typpioptimit sekä satotasot on esitetty taulukossa 14. Kvadraattifunktion ja dummy-muuttujat sisältävän kvadraattifunktion biologisesti optimaaliset lannoitustasot ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta lannoituksella saavutettavissa satotasoissa on eroavaisuutta.

TAULUKKO 14. Estimoitujen mallien biologiset optimaaliset typpilannoitustasot sekä satotasot.

Funktiomuoto	Biologisesti optimaalinen typpilannoitus (kg/ha)	Biologisesti optimaalinen satotaso (kg/ha)
Kvadraattifunktio	219	6874
Neliöjuurifunktio + toisen asteen termi	-	-
LRP	135	6426
Mitscherlich -funktio	-	-
kvadraattifunktio (vuosidummyt)	218	6470
neliöjuurifunktio (vuosidummyt)	-	-

Tämän jälkeen määriteltiin taloudellisesti optimaalinen typpilannoituksen taso ratkaisemalla piste, jossa rajatuotto on yhtä suuri kuin rajakustannus. Taloudellisesti optimaalinen satotaso saatiin sijoittamalla taloudellisesti optimaalinen typpilannoitusmäärä tuotantofunktioon. Taloudellisesti optimaaliset typpilannoitustasot sekä satotasot eri tuotantofunktioiden osalta on myös esitetty olevassa taulukossa 16.

Taulukon 16 tarkastelussa lannoitteen sekä mallasohran hintana käytetty vuoden 2017 keskihintaa. Tässä vaiheessa ei ole huomioitu mahdollista sadon valkuaispitoisuuden asettamaa rajoitetta typpilannoitukselle. Alun perin vertailussa mukana ollut neliöjuurifunktio antoi epärealistisia optimilannoitustasoja, joten se on korvattu neliöjuurifunktiolla, joka sisältää toisen asteen termin. Tässä funktiossa neliöjuuritermi ei kuitenkaan ollut merkitsevä, joten funktiomuodon antamia lannoitussuosituksia ei voida pitää luotettavina. Eri funktiomuotoihin perustuvien mallien taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot vaihtelevat jonkin verran. Korkeimman lannoitussuosituksen antaa vuosittaiset dummy-muuttujat sisältävä Mitscherlich-funktio ja alimman LRP-malli. LRP-mallissa typpilannoituksen taloudellisesti optimaalinen typpilannoituksen taso on 135, kun rajakus-

tannus on pienempi kuin rajatuotto. LRP-mallissa on ainoastaan kaksi suositeltavaa lannoitustasoa, jotka ovat 0 kg/ha tai nyt estimoidun mallin mukaan 135 kg/ha. Mikäli lannoituksen rajakustannus olisi suurempi tai yhtä suuri kuin rajatuotto, lannoitusta ei kannattaisi tehdä ollenkaan.

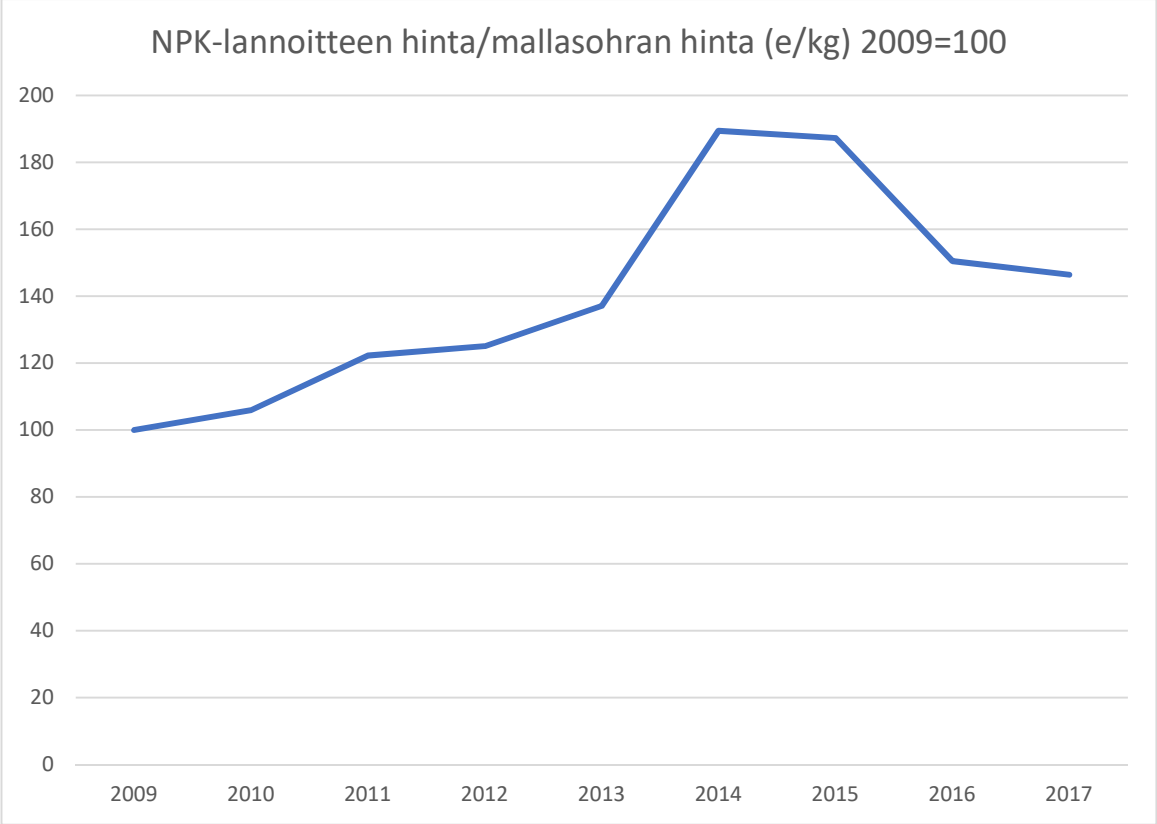
Taulukossa 16 esitettyä taloudellisesti optimaalista satotasoa tarkasteltaessa huomataan, että optimaaliset satotasot vaihtelevat paljon. Sekä Mitscherlich-funktioon että kvadraattifunktioon perustuvassa mallissa dummy-muuttujien lisääminen alentaa optimaalista satotasoa huomattavasti, vaikka lannoitusmäärä pysyy lähes samana. Lisäksi huomataan, että lajikekohtaisiin dummy-muuttujiin perustuvissa malleissa optimaalinen satotaso on alhaisempi kuin vuosittaisiin dummy-muuttujiin perustuvissa malleissa.

TAULUKKO 16. Estimoitujen mallien taloudellisesti optimaaliset typpilannoitustasot sekä satotasot vuoden 2017 lannoitteen ja mallasohran hintasuhteella.

Funktiomuoto	Taloudellisesti optimaalinen typpilannoitus (kg/ha)	Taloudellisesti optimaalinen satotaso (kg/ha)
Kvadraattifunktio	165	6600
Neliöjuurifunktio + toisen asteen termi	166	6493
LRP	135	6626
Mitscherlich -funktio	164	6503
kvadraattifunktio (vuosi-dummyt)	165	6204
kvadraattifunktio (lajike-dummyt)	164	5367
Mitscherlich -funktio (vuosi-dummyt)	165	6092
Mitscherlich -funktio (lajike-dummyt)	165	5260

Seuraavaksi tarkasteltiin, miten mallasohran ja seoslannoitteen erilaiset hintasuhteet vaikuttavat taloudellisesti optimaaliseen typpilannoituksen tasoon. Kuviossa 6 on ku-

vattu seoslannoitteen (YaraMila Y1) ja mallasohran hintasuhteen vaihtelua tarkastelujaksolla 2009–2017. Vuonna 2009 lannoitteen sekä mallasohran välinen hintasuhde oli tarkastelujakson matalin eli hintojen suhteellinen ero pienin. Vuonna 2014 suhteellinen ero oli suurin, jonka vuoksi tarkasteluun valittiin kyseiset vuodet.



KUVIO 6. NPK-lannoitteen sekä mallasohran hintasuhde vuosina 2009– 2017.

Taulukossa 17 on kuvattu taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot vuosien 2009, 2014 ja 2017 lannoitteen ja mallasohran hintasuhteilla. Taulukosta voidaan havaita, että hintasuhteen muutokset vaikuttavat optimaaliseen lannoitusmäärään voimakkaammin Mitscherlich-funktioon perustuvissa malleissa kuin kvadraattifunktioon perustuvissa malleissa. Myös toisen asteen termin sisältävään neliöjuurifunktioon perustuvassa mallissa hintasuhteiden vaikutus taloudellisesti optimaaliseen lannoitustasoon on voimakkaampi kuin kvadraattifunktioon perustuvassa mallissa. LRP-mallissa lannoitustasoon (0 kg/ha tai 135 kg/ha) vaikuttaa ainoastaan lannoitteen ja mallasohran hintasuhde. LRP-

mallin mukaan lannoitus on kannattavaa kaikkien tarkasteltujen vuosien lannoitteen ja mallasohran hintasuhteilla.

TAULUKKO 17. Estimoitujen mallien taloudellisesti optimaaliset typpilannoitustasot vuosien 2009, 2014 ja 2017 typpilannoitteen ja mallasohran hintasuhteilla.

Funktiomuoto	Taloudellisesti optimaalinen typpilannoitus v. 2009 (kg/ha)	Taloudellisesti optimaalinen typpilannoitus v. 2014 (kg/ha)	Taloudellisesti optimaalinen typpilannoitus v. 2017 (kg/ha)
Kvadraattifunktio	182	149	165
Neliöjuurifunktio + toisen asteen termi	205	139	166
LRP	135	135	135
Mitscherlich -funktio	203	138	164
kvadraattifunktio (vuosi-dummyt)	182	149	165
kvadraattifunktio (lajike-dummyt)	181	148	164
Mitscherlich -funktio (vuosi-dummyt)	205	139	165
Mitscherlich -funktio (lajike-dummyt)	204	139	165

Seuraavaksi estimoitiin typen valkuaisvasteen funktio. Estimoinnissa käytettiin lineaarista funktiota, kvadraattifunktiota ja neliöjuurifunktiota. Estimoiduista malleista korkein selitysaste oli kvadraattifunktioon perustuvassa mallissa (0,316). Matalin selitysaste oli lineaarisella mallilla (0,239). Estimoitujen mallien kertoimet ovat merkitseviä merkitsevyystasolla $\alpha = 0{,}001$ lukuun ottamatta kvadraattifunktioon perustuvan mallin kerrointa b, joka on merkitsevä merkitsevyystasolla $\alpha = 0{,}1$ eli 10 % riskillä. Estimoidut valkuaisvasteen funktiot on kuvattu taulukossa 18.

Funktioista ratkaistiin typpilannoituksen taso, jolla sadon valkuaispitoisuus on 12,05 %. Viking Maltin mallasohran sadon 2018 – 2019 hinnoittelutaulukon mukaisesti peruslaadun mallasohran korkein sallittu valkuaispitoisuus 11,5 %, mutta vähennykset sadosta saatavaan hintaan alkavat vasta valkuaispitoisuuden ollessa 12,1 %. Edellä kuvattu typpilannoituksen taso on esitetty taulukossa 19.

Neliöjuurifunktioon perustuvassa mallissa valkuaispitoisuus saavutti valkuaispitoisuuden 12,05 alhaisimmalla typpilannoituksen tasolla 170,7 kg/ha ja kvadraattifunktioon perustuvassa mallissa korkeimmalla typpilannoituksen tasolla 178,6 kg/ha. Kaikkien mallien valkuaispitoisuuden rajaa kuvaavat tulokset ovat kuitenkin hyvin lähellä toisiaan. Jatkotarkasteluun päätettiin valita neliöjuurifunktioon perustuva malli, koska sen selitysaste oli suurin ja kaikki kertoimet merkitseviä.

Eri funktiomuotoihin perustuvat valkuaispitoisuuden typpiresponssin mallit rajoittavat pääosin typpilannoitusta, jos tarkastellaan aiemmin estimoituja eri vuosien hintasuhteiden mukaisia optimilannoitustasoja eri sadon typpiresponssin funktiomuodoilla. Toisaalta korkeimman sallitun sadon valkuaispitoisuuden tuottavat typpilannoituksen tasot ovat hyvin lähellä taloudellisesti optimaalisia typpilannoitusmääriä.

TAULUKKO 18. Estimoidut typpilannoituksen valkuaisvasteen funktiot.

	Lineaarinen funktio $\mathbf{y = \alpha + \beta_1 x}$	**Kvadraattifunktio:** $\mathbf{y = \alpha + \beta_1 x + \beta_2 x^2}$	**Neliöjuurifunktio:** $\mathbf{y = \alpha + \beta_1 x + \beta_2 x^{1/2}}$
α	10,002 ***	10,580 ***	0,721 ***
β_1	0,011 ***	-0,006 .	0,030 ***
β2		0,001 ***	-0,298 ***

*Kertoimien merkitsevyys: 0‘***’ α=0.001, ‘**’α= 0.01, ‘*’ α=0.05, ‘.’ α=0.1, ‘ ’ α=1

TAULUKKO 19. Sadon valkuaispitoisuuden typpiresponssin mallien selitysasteet eri funktiomuodoilla sekä typpilannoitustaso, jolloin sadon valkuaispitoisuus on 12,05 %.

Funktiomuoto	R2	typpilannoitustaso, jolloin valkuaispitoisuus = 12,05 (kg/ha)
Lineaarinen	0,237	180,7
Kvadraattifunktio	0,304	180,9
Neliöjuurifunktio	0,316	173,3

Seuraavaksi määritettiin voittoa maksimoiva typpilannoitus eri funktiomuotoihin perustuvilla malleilla sekä eri vuosien hintasuhteilla huomioiden sadon valkuaispitoisuudesta aiheutuva rajoite typpilannoitukselle. Optimointi tehtiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Optimoinnissa on huomioitu mallasohran hinnan aleneminen valkuaispitoisuuden ylittäessä mallasohran laatuvaatimuksissa esitetyt valkuaispitoisuuden enimmäismäärät. Hinnoittelu perustuu kaksiportaiseen vähennykseen, joka on kuvattu taulukossa 20. Optimoinnissa on huomioitu sadon muuttuminen rehuohraksi valkuaispitoisuuden ylittäessä 13 %.

TAULUKKO 20. Mallasohran laatuhinnoittelu (Viking Malt, 2019).

	Valkuaispitoisuus, %	**Vähennys, €/tn**
Panimo-ohrat (sis. luomu)	12,1 – 12,5	-5
	12,6 – 13,0	-10

Optimoinnissa ei ole huomioitu hallinnollisia rajoitteita, koska typpilannoituksen taso on voinut olla 0–220 kg. Kahden lajikkeen lannoituskokeen osalta typpilannoituksen enimmäismääränä oli lannoituskokeissa käytetty typpilannoituksen tasona myös 280 kg/ha, mutta suurimmalla osalla lajikkeista enimmäislannoitusmäärä oli 220 kg/ha, jonka vuoksi sitä on käytetty myös optimoinnissa.

Taulukossa 21 on kuvattu taloudellisesti optimaaliset lannoitusmäärät edellä mainitut rajoitteet huomioiden. Taulukossa on huomioitu eri vuosien typpilannoitteen ja mallasohran hintasuhteet sekä merkitty tähdellä (*) ne määritetyt taloudelliset optimitasot, joissa valkuaisrajoite laskee taloudellisesti optimaalista typpilannoitustasoa. Kaikilla funktiomuodoilla paitsi LRP-mallilla havaitaan, että valkuaisrajoite rajoittaa taloudellisesti optimaalista typpilannoitustasoa ainoastaan lannoitteen ja mallasohran vuoden 2009 hintasuhteella. Vuosien 2014 ja 2017 hintasuhteilla valkuaisrajoite ei rajoita lannoitusta vaan taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso on matalampi kuin rajoite. LRP-mallissa valkuaisrajoite ei rajoita lannoitusta.

TAULUKKO 21. Mallasohran taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot huomioiden valkuaisrajoite sekä vuosien 2009, 2014 sekä 2017 typpilannoitteen ja mallasohran hintasuhteet.

Funktiomuoto	Taloudellisesti optimaalinen typpilannoitus v. 2009 (kg/ha)	Taloudellisesti optimaalinen typpilannoitus v. 2014 (kg/ha)	Taloudellisesti optimaalinen typpilannoitus v. 2017 (kg/ha)
Kvadraattifunktio	173*	149	165
Neliöjuurifunktio + toisen asteen termi	173*	139	166
LRP	135	135	135
Mitscherlich-funktio	173*	138	164
kvadraattifunktio (vuosidummyt)	173*	149	165
kvadraattifunktio (lajikedummyt)	173*	148	164
Mitscherlich -funktio (vuosidummyt)	173*	139	165
Mitscherlich -funktio (lajikedummyt)	173*	139	165

*valkuaisrajoite laskee taloudellisesti optimaalista lannoitustasoa

Taulukossa 22 on kuvattu eri lannoitussuositusten antamat katetuotot vuosien 2009, 2014 sekä 2017 typpilannoitteen ja mallasohran hintasuhteilla. Kaikkiin funktiomuotoi-

hin perustuvien mallien katetuotot ovat melko lähellä toisiaan verrattaessa saman vuoden optimikatteita. Dummy-muuttujiin perustuvien mallien katetuotot ovat sekä Mitscherlich-funktioon perustuvissa malleissa, että kvadraattifunktioon perustuvissa malleissa jonkin verran alempia. Lisäksi lajikekohtaiset dummy-muuttujat sisältävissä malleissa katetuotot ovat melko paljon alhaisempia kuin vuosikohtaiset dummy-muuttujat sisältävissä malleissa.

TAULUKKO 22. Mallasohran taloudellisesti optimaalisten lannoitustasojen katetuotot (€/ ha) huomioiden valkuaisrajoite sekä vuosien 2009, 2014 sekä 2017 typpilannoitteen ja mallasohran hintasuhteet.

Funktiomuoto	Katetuotto v. 2009 €	Katetuotto v. 2014, €	Katetuotto v. 2017, €
Kvadraattifunktio	574	583	631
Neliöjuurifunktio + toisen asteen termi	562	570	616
LRP	596	634	672
Mitscherlich-funktio	565	574	619
kvadraattifunktio (vuosidummyt)	533	532	580
kvadraattifunktio (lajikedummyt)	446	424	475
Mitscherlich -funktio (vuosidummyt)	521	519	566
Mitscherlich -funktio (lajikedummyt)	434	411	460

Seuraavaksi tarkasteltiin miten ympäristökorvauksen aiheuttama rajoite typpilannoituksen tasolle vaikuttaa katetuottoon. Satotasokorjaus 5500 kg/ha satotasolle huomioiden typpilannoituksen enimmäismäärä mallasohralle on 130 kg/ha. Taulukossa 23. on kuvattu miten edellä mainittu rajoite vaikuttaa katetuottoon. Ympäristökorvauksen mukaisen typpilannoituksen enimmäismäärän huomioiminen laskee katetuottoa 0-25 €/ha riippuen lannoitteen ja mallasohran hintasuhteista sekä funktiomuodosta.

TAULUKKO 23. Mallasohran taloudellisesti optimaalisten lannoitustasojen katetuotot (€/ ha) huomioiden valkuaisrajoite, ympäristökorvauksen rajoite typpilannoitukselle (130 kg/ha) sekä vuosien 2009, 2014 sekä 2017 typpilannoitteen ja mallasohran hinta-suhteet.*

Funktiomuoto	Katetuotto v. 2009, €	Katetuotto v. 2014, €	Katetuotto v. 2017, €
Kvadraattifunktio	549 (-25)	579 (-4)	617 (-14)
Neliöjuurifunktio + toisen asteen termi	541 (-21)	570 (0)	607 (-9)
LRP	584 (-12)	623 (-11)	660 (-12)
Mitscherlich-funktio	545 (-20)	574 (0)	611 (-8)
kvadraattifunktio (vuosidummyt)	508 (-25)	528 (-4)	566 (-14)
kvadraattifunktio (lajikedummyt)	421 (-25)	420 (-4)	461 (-14)
Mitscherlich -funktio (vuosidummyt)	500 (-21)	519 (0)	557 (-9)
Mitscherlich -funktio (lajikedummyt)	413 (-21)	410 (-1)	451 (-9)

* Taulukossa on esitetty suluissa () ympäristökorvauksen huomioimisesta aiheutuva vähennys katetuottoon

5.3. Mallasohralajikkeiden vertailu

Edellisessä kappaleen regressiomallit oli määritetty koko käytettävissä olevasta lannoituskoeaineistosta, joten tässä kappaleessa vertaillaan eri lajikkeita. Vertailuun valittiin lajikkeet, joista oli havaintoja vähintään 15 kappaletta. Vertailuun valittiin seuraavat lajikkeet: Barke, Iron, Laureate, Melius, Posada, Propino, Publican, Soulmate, Trekker. Aluksi estimoitiin valituille 9 lajikkeelle tuotantofunktio käyttäen funktiomuotona kvadraattifunktiota. Kvadraattifunktion käyttöön päädyttiin, koska koko aineistoa koskevassa regressiossa kvadraattifunktion BIC-testisuure oli toiseksi pienin ja lisäksi se on yleisesti käytetty funktiomuoto typen satovasteen mallinuksessa. Tämän jälkeen estimoitiin typpilannoituksen valkuaisvastetta kuvaava regressioyhtälö käyttäen funk-

tiomuotona neliöjuurifunktiota. Neliöjuurifunktiota päädyttiin käyttämään funktiomuotona, koska se antoi korkeimman selitysasteen koko aineiston käsittävässä regressiomallissa.

TAULUKKO 24. Eri mallasohralajikkeiden sadon sekä valkuaispitoisuuden typpiresponssifunktioiden kertoimet.

	Barke	**Iron**	**Laureate**	**Melius**	**Posada**	**Propino**	**Publican**	**Soulmate**	**Trekker**
havaintojen lukumäärä (kpl)	24	24	18	24	24	66	36	24	24
Tuotantofunktio $\mathbf{Y = \alpha + \beta_1 x + \beta_2 x^2}$									
$\boldsymbol{\alpha}$	2145,404 ***	3217,046 ***	2154,278 *	2473,501 ***	2748,572 ***	2084,616 ***	2076,265 ***	2035,764 **	2598,978 **
$\boldsymbol{\beta_1}$	32,665 ***	38,188 ***	63,307 ***	40,735 ***	43,349 ***	36,712* **	35,635 ***	53,975 ***	38,876 **
$\boldsymbol{\beta_2}$	-0,066 *	-0,105 **	-0,159 *	-0,091 *	-0,093 *	-0,082 *	-0,058 *	-0,139 **	-0,081 .
selitysaste (R^2)	0,844	0,750	0,721	0,696	0,764	0,491	0,849	0,703	0,648
Valkuaisregressio $\mathbf{Y = \alpha + \beta_1 x + \beta_2 x^{½}}$									
$\boldsymbol{\alpha}$	10,846 ***	10,051 ***	10,532 ***	10,104 ***	10,086 ***	11,415 ***	10,801 ***	10,280 ***	9,603 ***
$\boldsymbol{\beta_1}$	0,0283 *	0,0262 .	0,0284 ***	0,030 ***	0,028 ***	0,033 ***	0,024 *	0,032 ***	0,031 ***
$\boldsymbol{\beta_2}$	-0,248	-0,120	-0,381 ***	-0,275 **	-0,244 *	-0,358 **	-0,259	-0,383 ***	-0,248 **
selitysaste (R^2)	0,330	0,491	0,772	0,707	0,712	0,252	0,163	0,818	0,817

*Kertoimien merkitsevyys: 0‘***’ α=0.001, ‘**’α= 0.01, ‘*’ α=0.05, ‘.’ α=0.1, ‘ ’ α=1

Taulukossa 24 esitetyt tuotantofunktion estimoinnin tulokset osoittavat, että kaikkien lajikkeiden kaikki kertoimet ovat merkitseviä vähintään merkitsevyystasolla α = 0,1 eli 10 % riskillä. Korkein riskitaso on toisen asteen kertoimilla, jotka ovat pääosin merkittäviä α = 0,05 eli 5 % riskillä. Muiden termien kertoimet ovat pääosin merkitseviä merkitsevyystasolla α = 0,01 eli 1 % riskillä. Estimoitujen typen valkuaisvasteen funktioiden osalta kaikkien lajikkeiden vakiotermit ovat merkitseviä merkitsevyystasolla α = 0,01 eli 1 % riskillä, mutta muut termit eivät joidenkin lajikkeiden osalta ole ollenkaan merkitseviä. Regressioiden luotettavuutta heikentää havaintojen pieni määrä usean lajikkeen osalta.

Regressiomallien estimoimisen jälkeen määritettiin lajikkeittain taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot. Lannoitustasojen määrityksessä käytettiin typpilannoitteen sekä mallasohran hintana vuoden 2017 keskihintaa. Lisäksi määritettiin typpilannoituksen taso, jolloin valkuaispitoisuus on 12,05 %. Tässä tarkastelussa huomioitiin ainoastaan lajikkeet, joiden valkuaisregression kaikki kertoimet ovat merkitseviä vähintään merkitsevyystasolla α = 0,1 eli 10 % riskillä. Tämän jälkeen määritettiin taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot huomioiden valkuaispitoisuuden aiheuttama rajoite ja rajoitteen ylittävästä valkuaispitoisuudesta aiheutuvat vähennykset sadosta saatavaan hintaan. Tulokset on kuvattu taulukossa 24.

TAULUKKO 25. Mallasohran taloudellisesti optimaalisten lannoitustasojen katetuotot huomioiden valkuaisrajoite sekä vuoden 2017 lannoitteen ja mallasohran hintasuhde.

	Barke	Iron	Laureate	Melius	Posada	Propino	Publican	Soulmate	Trekker
Taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso (kg/ha)	172	133	168	169	179	164	220	157	179
Lannoitustaso, jolloin valkuaispitoisuus = 12,05 % (kg/ha)	-	-	275,3*	194,5	187,7	152,5	-	243,4*	193,3
Taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso huomioiden valkuaisrajoite (kg/ha	-	-	168	169	179	152	-	157	179
Optimikate huomioiden valkuaisrajoite (€/ha)	-	-	845	646	732	543	-	700	660
Satotaso huomioiden valkuaisrajoite (kg/ha)	-	-	8313	6762	7531	5913	-	7064	6971
Optimikate huomioiden ympäristökorvauksen aiheuttama rajoite satotasolla 5500 kg/ha (typpilannoitus 130 kg/ha)	-	-	817	629	703	533	-	687	636

- lajikkeen valkuaisregression kaikki kertoimet eivät ole merkittäviä merkitsevyystasolla α = 0,1 eli 10 % riskillä

* lannoitusmäärä ylittää kokeen typpilannoituksen havaintoalueen (0-220 kg/ha), joten suositusta ei voi pitää luotettavana

Taulukon 25 tulosten mukaan taloudellisesti optimaalisen satotason tuottava typpilannoituksen määrä vaihtelee eri lajikkeilla välillä 133 – 220 kg/ha. Vaihteluväli lajikkeesta riippuen on melko suuri. Typpilannoitustaso, jolla sadon valkuaispitoisuus on 12,05 % vaihtelee välillä 152,5 - 275,3 kg ha. Propinolla typpilannoituksen taso, jolla sadon valkuaispitoisuus on 12,05 % on merkittävästi alempi kuin muilla lajikkeilla. Ainoastaan Propinolla valkuaispitoisuuden nousu rajoittaa typpilannoitusta. Taulukossa 25 on tarkasteltu myös taloudellisesti optimaalista lannoitustasoa, jossa on huomioitu valkuaispitoisuuden noususta aiheutuvat vähennykset. Tulosten mukaan typpilannoitusta ei tule millään lajikkeella lisätä yli rajan, jossa sadon valkuaispitoisuus on 12,05 %, koska liian korkeasta valkuaispitoisuudesta aiheutuvat vähennykset sadon hintaan laskevat katettuottoa. Korkein optimikate oli Laureate -lajikkeella ja matalin Propino -lajikkeella. Taulukon 25 alimmalla rivillä on tarkasteltu miten optimikate muuttuu, kun huomioidaan ympäristökorvauksen aiheuttama rajoite typpilannoitukselle. Satotasokorjaus 5500 kg/ha satotasolle huomioiden typpilannoituksen enimmäismäärä on mallasohralla 130 kg/ha. Rajoite huomioiden optimikate laskee lajikkeesta riippuen 10 – 28 €/ha. Ympäristötuen ehtojen aiheuttama katetuoton vähennys on melko pieni.

6. Tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa tarkasteltiin kvadraattifunktioon, Mitscherlich-funktioon sekä, LRP-malliin sekä neliöjuurifunktioon perustuvia malleja. Neliöjuurifunktioon perustuvan mallin antamat lannoitussuositukset olivat epärealistisen korkeita, jonka vuoksi funktiomuoto korvattiin neliöjuurifunktiolla, joka sisältää myös toisen asteen termin. Estimoiduissa malleissa kaikilla funktiomuodoilla paitsi LRP-mallissa ja Mitscherlich-funktioon perustuvissa malleissa esiintyi heteroskedastisuutta. Koska malleissa havaittiin heteroskedastisuutta, olisi estimoinnissa voinut käyttää WLS regressiota tai heteroskedastisuuskorjattuja keskivirheitä regressiokertoimille. Toisaalta tutkimuksessa OLS -menetelmällä estimoidut kertoimet ovat kuitenkin harhattomia ja tarkentuvia, mutta kertoimien merkitsevyydet eivät olleet luotettavia.

BIC-testisuureen sekä selitysasteen ja pseudoselitysasteen kautta tarkasteltaessa parhaiten mallasohran typpilannoituksen satovastetta kuvaavat kvadraattifunktio sekä Mitscherlich-funktio. Näiden väliset erot BIC-testisuureissa ja selitysasteissa olivat lähes olemattomia. Vuosikohtaisten Dummy-muuttujien lisääminen tarkasteluun nosti selitysastetta ja teki BIC-testisuureista pienempiä. Lajikekohtaisten dummy-muuttujien lisääminen nosti myös selitysastetta, mutta teki BIC-testisuureista suurempia. Tutkimuksen perusteella Mitscherlich-funktion ja kvadraattifunktion tai toisen asteen termin sisältävän neliöjuurifunktion antamilla lannoitussuosituksilla ei ollut kovin suurta eroa, kun tarkasteltiin eroja tietyn vuoden mallasohran ja lannoitteen hintasuhteella. Typpilannoitteen ja mallasohran hintasuhteiden muuttuminen vaikutti optimaalisen typpilannoitusmäärän muuttumiseen voimakkaimmin Mitscherlich-funktiolla muutosten ollessa pienempiä kvadraattifunktioon perustuvissa malleissa. LRP-malliin perustuvan tuotantofunktion mukaan typpilannoitus oli kannattavaa kaikilla mallasohran ja lannoitteen hintasuhteilla.

Sumelius on vertaillut tutkimuksessaan (1993, 479) Mitscherlich-funktiota, kvadraattifunktiota ja neliöjuurifunktiota ja todennut Mitscherlich-funktion kuvaavan parhaiten ohran satovastetta. Mitscherlich-funktioon perustuvien mallien lannoitussuositukset olivat ohralla korkeampia kuin kvadraattifunktioon perustuvien mallien sekä Sumeliuksen

tutkimuksessa että nyt tehdyssä tutkimuksessa. Sumeliuksen tutkimuksessa havaittiin myös typen hintamuutosten vaikuttavan voimakkaammin Mitscherlich-funktioon perustuvan mallin lannoitussuosituksiin. Sama vaikutus havaittiin nyt tehdyssä tutkimuksessa. Bäckman ym. (1997, 158) ovat tutkimuksessaan vertailleet Mitscherlich-funktiota, kvadraattifunktiota ja LRP-mallia ohran typpilannoituksen satovasteen mallintamisessa. Korkein selitysaste oli kvadraattifunktioon perustuvalla, mutta erot olivat pieniä.

Tutkimuksessa määritellyt taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot ovat huomattavasti korkeampia kuin esimerkiksi mallasohran viljelysuosituksissa suositeltu kivennäismaiden typpilannoitustaso, joka on 100 kg/ha (VYR 2012). Lisäksi tutkimuksessa määritetty lannoitustaso on jonkin verran ympäristötuen mukaisia typpilannoituksen enimmäismääriä korkeampi, kun huomioidaan satotasokorjaukset. Mallasohran typpilannoituksen ympäristökorvauksen mukainen enimmäismäärä on 100 kg/ha, kun saavutettu satotaso on 4000 kg/ha. Typpilannoitusta on mahdollista lisätä enimmillään 50kg/ha, mikäli saavutettu satotaso on 6500 kg/ha. Näin ollen suurin mahdollinen typpilannoitusmäärä olisi 150 kg/ha. Vaikka tutkimuksessa tarkastellaan ainoastaan typpilannoituksen vaikutusta satotasoon ja valkuaispitoisuuteen, tulee ottaa huomioon, että seoslannoitetta käytettäessä myös muiden ravinteiden samassa suhteessa lisääntynyt määrä nostaa taloudellisesti optimaalista typpilannoituksen tasoa ylöspäin. Jos lannoituskokeissa olisi käytetty ainoastaan typpeä sisältävää lannoitetta, niin optimaalinen typpilannoitustaso olisi todennäköisesti matalampi

Tutkimuksessa tarkasteltiin miten ympäristökorvauksen ehtojen enimmäismäärän mukainen typpilannoitus vaikuttaa katetuottoon, kun huomioidaan 5500 kg/ha satotasokorjauksen mukainen typpilannoituksen taso 130 kg/ha. Funktiomuodosta ja eri vuosien lannoitteen ja mallasohran hintasuhteesta riippuen katetuotto oli 0-25 €/ha matalampi kuin ilman rajoitetta. Näin ollen ympäristötuen ehtojen noudattamisesta aiheutuva katetuoton lasku on mallasohralla melko pieni. Tutkimuksessa määritetty optimaalinen lannoitustaso ylittää kuitenkin kaikkien vuosien lannoitteen ja mallasohran hintasuhteella tutkimuksessa käytetyn suurimman mahdollisen ympäristökorvauksen ehtojen

mukaisen lannoitusmäärän (130 kg/ha), mutta joinain vuosina optimaalinen lannoitustaso on vain hieman korkeampi.

Lajikkeiden välisessä vertailussa typpilannoitussuositus vaihteli vuoden 2017 lannoitteen ja mallasohran hintasuhteella välillä 152-179 kg/ha. Lajikkeiden väliset erot olivat melko suuria, mutta estimoinnin luotettavuutta heikentää havaintojen pieni määrä. Ainoastaan yhdellä lajikkeella valkuaispitoisuuden nousu liian korkeaksi rajoitti lannoitussuositusta.

Tutkimuksen tuloksia tarkasteltaessa tulee huomioida, että lannoituskoeolosuhteet poikkeavat usein käytännön viljelystä esimerkiksi siten, että kasvuolosuhteet ovat koepaikoilla usein melko vakioidut, jolloin taloudellisesti optimaaliset lannoitustasot saattavat olla korkeampia kuin käytännön viljelyssä. Käytännön viljelyssä lohkojen välillä ja niiden sisällä saattaa olla suuriakin eroja olosuhteissa muun muassa maalajin, maan ravinteiden sekä vesitalouden suhteen. Lisäksi tulee huomioida, että suurin osa lajikekohtaisisten lannoituskokeiden havainnoista sisälsi kasvinsuojeluainekäsittelyn, joka todennäköisesti nostaa satotasoa. Tämä voi vaikuttaa myös lajikekohtaisen vertailun tuloksiin, koska osa Publican, Barke ja Propino -lajikkeiden havainnoista ei sisältänyt kasvinsuojeluainekäsittelyä. Aineistossa ei ole myöskään tarkennettu onko kyse rikkakasvitorjunnasta, kasvitautien torjunnasta vai korrensääteestä.

Aineistossa ollut vähäinen havaintojen määrä heikensi estimoinnin luotettavuutta varsinkin lajikekohtaisia tuotantofunktioita estimoitaessa, koska joidenkin lajikkeiden osalta havaintoja oli vähimmillään ainoastaan 18 kappaletta. Lisäksi eri lajikkeet ovat olleet mukana kokeessa eri vuosina ja joidenkin lajikkeiden osalta havaintoja on useammalta vuodelta, kun taas toisten lajikkeiden osalta ainoastaan yhdeltä vuodelta. Tämäkin heikentää lajikkeiden välisen vertailun luotettavuutta.

Aineisto sisälsi kaikkien havaintojen osalta tiedon maalajista, mutta tietoa ei hyödynnetty tutkimuksessa. Mikäli havaintoja olisi ollut enemmän olisi ollut mielenkiintoista si-

sällyttää maalaji yhtenä muuttujana estimointiin tai vaihtoehtoisesti estimoida tuotantofunktiot eri maalajeille ja tarkistella miten tämä vaikuttaa optimaalisiin typpilannoituksen tasoihin. Esimerkiksi Sumeliuksen (1993, 475) tutkimuksessa taloudellisesti optimaalisissa typpilannoitustasoissa oli huomattavia eroja tarkasteltaessa tuotantofunktioita eri maalajeilla (hieta, hiuesavi).

7. Johtopäätökset

Tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella, mikä funktiomuoto kuvaa parhaiten mallasohran typpilannoituksen satovastetta, sekä arvioida, miten tuotos- ja panoshintojen sekä mallasohran ja typpilannoitteen hintasuhteiden vaihtelu vaikuttaa mallasohran optimaaliseen lannoitustasoon huomioiden valkuaispitoisuuden aiheuttama rajoite. Tutkimusaineisto käsitti 368 mallasohran lannoitushavaintoa Yaran Kotkanniemen koekentältä.

Tutkimuksen tulosten perusteella mallasohran typpilannoituksen satovastetta kuvasi parhaiten kvadraattifunktioon sekä Mitscherlich-funktioon perustuvat mallit. Neliöjuurifunktioon perustuvien mallien antama lannoitussuositus oli epärealistisen korkea, jonka vuoksi mallia tarkasteltiin lisäämällä siihen toisen asteen termi. LRP-mallin BIC-testisuure ei myöskään poikennut juurikaan muista malleista, mutta testisuure oli hieman muita malleja suurempi, jolloin malli ei selittänyt datan kokonaisvaihtelua yhtä hyvin kuin muut mallit.

Tutkimuksen tulosten perusteella taloudellisesti optimaalinen mallasohran typpilannoitus huomioiden valkuaispitoisuuden aiheuttama rajoite vaihtelee eri funktiomuotojen antamien tulosten perusteella 135-173 kg/ha välillä, kun huomioidaan eri vuosien lannoitteen ja mallasohran hintasuhteet. Vuosikohtaisesti mallien väliset lannoitussuositusten erot ovat yllättävän pieniä, jos ei oteta huomioon LRP-mallia. Esimerkiksi vuonna 2009 lannoitussuositukset vaihtelivat välillä 139—149 kg/ha.

Sadon enimmäisvalkuaispitoisuuden aiheuttama rajoite rajoitti lannoitusta ainoastaan vuoden 2009 lannoitteen ja mallasohran hintasuhteella. Vuosien 2014 ja 2017 hintasuhteilla taloudellisesti optimaalinen lannoitustaso oli alempi kuin valkuaispitoisuuden aiheuttama rajoite. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että mallasohran laatuvaatimusten mukaiset liian korkeasta valkuaispitoisuudesta aiheutuvat vähennykset sadosta saatavaan hintaan ovat tehokkaita, koska ne kannustavat lannoittamaan niin, ettei valkuaispitoisuus nouse liian korkeaksi.

Eri funktiomuotojen taloudellisesti optimaalisten lannoitustasojen mukaisia katetuottoja tarkasteltaessa havaittiin, että erot katetuottojen välillä ovat melko pieniä tehtäessä vertailua saman vuoden sisällä. Ainoastaan lajikekohtaisten dummy-muuttujien sisällyttäminen estimointiin pienensi katetuottoa melko paljon.

Lähteet

Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control 19, 716–723.

Arovuori, K., Toikkanen, H. & Yrjölä, T. 2016. Kansallisen viljastrategian väliraportti – katsaus sektorin tilanteeseen ja toimenpidesuositukset. Pellervon taloustutkimus. Helsinki.

Asteriou, D. & Hall, S.G. 2016. Applied Econometrics. A Modern Approach using EViews and Microfit. Revised Edition. Palgrave Macmillan.

Barraclough, P.B., Howarth, J.R., Jones, J., Lopez-Bellido, R., Parmar, S., Shepherd, C.E. & Hawkesford, M.J. 2010. Nitrogen efficiency of wheat: Genotypic and environmental variation and prospects for improvement. European Journal of Agronomy 33(1), 1–11.

Brorsen, B.W. & Richter, F.G. 2012. Experimental designs for estimating plateau-type production functions and economically optimal input levels. Journal of Productivity Analysis 38, 45–52.

Bäckmann, S.T., Vermeulen, S., Taavitsainen, V.M. 1997. Long-term fertilizer field trials: comparison of three mathematical response models. Agricultural and Food science 6(2), 151–160.

Cerrato M.E. & Blackmer, A.M. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. Agronomy Journal 82, 138–143.

Challinor, A.J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M, Smith, D.R., Chhetri N. 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaption. Nature climate change. Vol 4. Macmillan Publishers Limited.

Donovan, J.T., Turkington, T.K., Edney, M.J., Clayton, G.W., McKenzie, R.H., Juskiw, P.E., Lafond, G.P., Grant, C.A., Brandt, S., Harker, K.N., Johnson, E.N., May W.E. 2011. Seeding Rate, Nitrogen Rate, and Cultivar Effects on Malting Barley Production. Agronomy Journal 103(3), sivut 709–716. Wiley & Sons.

Fabozzi, F.J., Focardi, S.M., Rachev, S.T., Arshanapalli, B.G. 2014 The Basics of Financial Econometrics: Tools, Concepts, and Asset Management Applications.

Gali, V. J., Brown C. G., 2000 Assisting decision-making in Queensland barley production through chance constrained programming. The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics 44(2), 269–287.

Hong, N., Scharf, P.C, Davis, J.G., Kitchen, N.R, Sudduth, K. A. 2007. Economically Optimal Nitrogen Rate Reduces Soil Residual Nitrate. Journal of environmental quality 36, 354–362. ASA, CSSA, SSSA. USA

Jensen, L.S., Schjoerring, J.K. 2011 Benefits of nitrogen for food, fiber and industrial production. In: Sutton, Sutton, M.A. et al. The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press. Cambridge, UK, 32–61.

Juntti, L. 2003. Typpilannoituksen ja kasvinsuojeluaineiden käytön vaikuts mallas- ja rehuohranviljelyn taloudelliseen tulokseen. MTT:n selvityksiä 40. MTT Taloustutkimus. Helsinki

Kennedy, P. 2014. A guide to econometrics. Sixth edition. Blackwell Publishing.

Lanzer, E.A., Paris, Q. 1981. A new Analytical Framework for the fertilization problem. American Journal of Agricultural Economics 63, 93–103.

Luonnonvarakeskus 2018. Typpi- ja fosforitaseet. Viitattu 24.8.2018: https://www.luke.fi/ruokafakta/peltomaan_kasvit/typpi_ja_fosforitaseet/

Luonnonvarakeskus. 2018b. Käytössä oleva maatalousmaa ELY-keskuksittain. Viitattu 8.9.2018 http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__02%20Maatalous__04%20Tuotanto__22%20Kaytossa%20oleva%20maatalousmaa/?tablelist=true&rxid=675ee983-5c97-4dbe-bc1f-7b06d08731e8

Marttinen, S., Venelampi, O., Iho, A., Koikkalainen, K., Lehtonen, E., Luostarinen, S., Rasa, K., Sarvi, M., Tampio, E., Turtola, E., Ylivainio, K., Grönroos, J., Kauppila, J., Koskiaho, J., Valve, H., Laine-Ylijoki, J., Lantto, R., Oasmaa, A., zu Castell-Rüdenhausen, M. 2017 Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa. Nykytila ja suositukset ohjauskeinojen kehittämiseksi. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus. LUKE. Helsinki

Taloustohtori. (viitattu 12.8.2018) https://portal.mtt.fi/portal/pls/portal/tt_mtt.tt_mtt_kankir_pack.laheta

Therrien, M.C., Carmichael, C.A., Noll, J.S., Grant, C.A. 1994. Effect of fertilizer management, genotype, and environmental factors on some malting quality characteristics in barley. Canadian Journal of Plant Sciecnce 74(3), 545–547

Perrin, R. 1976. The value of information and the value of theoretical models in crop response research. American journal of agricultural economics 58(1), 54–61.

ProAgria Tuottopuntari. Mallasohran katetuottolaskelma 2018. (viitattu 28.2.2019) https://www.webwisu.fi/tuottopehtori/index.php?rt=frontpage/index

Popp, A., Calvin, K., Fujimori, S., Havlik, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Bodirsky, B.L., Dietrich, J.P., Doelman, J.C., Gusti, M., Hasegawa, T., Kyle, P., Obersteiner, M., Tabeau, A., Takahashi, K., Valin, H., Waldhoff, S., Weindl, I., Wise, M., Kriegler, E., Lotze-Campen, H., Fricko, O., Riahi, K., van Vuuren, D.P. 2017 Land-use futures in the shared socio-economic pathways. Global Environmental Change 42, 331–345.

Rasmussen, S. 2010. Production Economics. Springer. Berlin.

Ryhänen, M. 1996. Maatalousyrittäjän päätöksenteko. Maatalousyritysten sopeutuminen EU:ssa vallitseviin hintasuhteisiin. Teoksessa: Ylätalo, M. (toim.) Tuotanto- ja kustannusteoreettinen tarkastelu kasvinviljelyyn ja kotieläintuotantoon sovellettuna. Helsingin yliopiston taloustieteen laitoksen julkaisuja 12, s.9–23

Schwarz, G. 1978. Estimating the dimension of a model. Annals of Statistics 6, 461–464.

Seppälä, R., Kontturi, M. 1987. Mallasohran reagointi typpilannoitukseen. Maatalouden tutkimuskeskus. Kasvinviljelyosasto. Tiedote 8/87, 1-66.

Sihvonen, M., Hyytiäinen, K., Valkama, E., Turtola, E. 2018. Phosphorus and Nitrogen Yield Response Models for Dynamic Bio-Economic Optimization: An Empirical Approach. Agronomy 8(4), 1–26

Snyder, C.S, Bruulsem, W.T. 2007 Nutrient use efficiency and effectiveness in Norh America: Indices of agronomic and environmental benefit. International plant nutrition institute: Peachtree Corners, GA. USA.

Sumelius, J. 1993. A Response analysis of wheat and barley to nitrogen in Finland. Agricultural science in Finland. No 3, s.465–480.

Suomen kasvilajikeluettelo 2017. Elintarviketurvallisuusvirasto. viitattu 7.9.2018 https://www.evira.fi/globalassets/tietoa-evirasta/julkaisut/julkaisusarjat/kasvit/sk_4_2017.pdf

Niemi, J., Väre, M. (toim.). 2017. Suomen maa- ja elintarviketalous 2016/2017. Luonnonvara ja biotalouden tutkimus 17/2017. Luonnonvarakeskus. Helsinki

Tilastokeskus. 2018. Viitattu 25.8.2018. http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__hin__ttohi/?rxid=1cffe423-b8e3-4715-81bb-fef10c5cfdd2

Torp, J., Doll, H., Haahr, V., 1981. Genotypic and environmental influence upon the nutritional composition of barley grain. Euphytica 30(3), 719–728

Uusitalo, R., Ekholm, P., Turtola, E., Pitkänen, H., Lehtonen, H., Granlund, K., Bäck, S., Puustinen, M., Räike. A., Lehtoranta, J., Rekolainen, S., Walls, M., Kauppila, P. 2007. Maatalous Itämeren rehevöittäjänä. Maa- ja elintarviketalous 96. MTT. Jokioinen

Valkama, E., Salo, T., Esala, M., Turtola, E. 2013. Nitrogen balances and yields of spring cereals as affected by nitrogen fertilization in northern conditions: A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment 164, 1–13.

Valkama, E., Rankinen, K., Virkajärvi, P., Salo, T., Kapuinen, P. & Turtola, E. 2016. Nitrogen fertilization of grass leys: Yield production and risk of N leaching. Agriculture, Ecosystems and Environment 230, 341–352.

Valtioneuvoston asetus ympäristökorvauksesta. Helsinki. Maa- ja metsätalousministeriö 19.3.2015

Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta 1250/2014. Helsinki. Maa- ja metsätalousministeriö 18.12.2014.

Viking Malt. 2018. Mallasohran laatuvaatimukset ja -hinnoittelu sato 2018/2019. Viitattu 8.9.2018 http://vikingmalt.fi/wp-content/uploads/2018/01/Sato-2018-19-Laatuvaatimukset-ja-hinnoittelu.pdf

Vilja-alan yhteistyöryhmä (VYR). 2012. Mallasohran viljelyopas. Viitattu 8.9.2018 https://www.vyr.fi/mallasohran-viljelyopas/mallasohran-viljelyopas/

Viljatietopankki. 2018. viitattu 9.9.2018 https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/taloustohtori/viljatietopankki/itameren_maat/viljantuotanto/kustannuserittely/suomi

Yli-Halla, M. 2009. Kasviravinteet. Teoksessa: Peltonen, J., Harmoinen, T. (toim.). Ravinteet kasvintuotannossa ProAgria keskusten liiton julkaisuja nro 1071. Keuruu.

Quirinho, P. 1992. The Von Liebig Hypothesis. American Journal of Agricultural Economics 74(4), 1019–1028.